



UNIVERSITE DE LA REUNION
U.F.R. DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de La Réunion

Discipline : **Traitement du signal et de l'image**

Présentée et soutenue publiquement

par

Valentine LEBOURGEOIS

Le 21 Avril 2008

UTILISATION D'UN SYSTEME LEGER D'ACQUISITIONS AEROPORTEES DANS LES DOMAINES OPTIQUES REFLECTIF ET THERMIQUE POUR LA CARACTERISATION DE L'ETAT HYDRIQUE ET NUTRITIONNEL DES CULTURES

APPLICATION À LA CULTURE DE LA CANNE À SUCRE À LA RÉUNION

JURY

M. Petit – IRD – Directeur de recherche, Montpellier (FR).....	Rapporteur
M. Van Den Berg – SASRI – Senior Researcher, Durban (SA)	Rapporteur
A. Bégué – CIRAD – Chercheur, HDR, Montpellier (FR)	Directrice de thèse
N. Villeneuve – CR2 IRD / MC Université de la Réunion (FR).....	Examineur
P. Todoroff – CIRAD – Chercheur, Réunion (FR)	Examineur
B. Siegmund – CERF – Directeur, Réunion (FR)	Invité

A toutes ces soirées, passées en « tête à thèse » avec mon ordinateur...



JORGE CHAM ©THE STANFORD DAILY

phd.stanford.edu

Remerciements

Si les remerciements constituent la seule partie que l'on se réjouit de rédiger dans la thèse (!), ils n'en demeurent pas moins difficiles à écrire tant ils sont teintés de souvenirs et d'émotions... !

Je tiens en premier lieu à remercier Agnès Bégué, ma directrice de thèse. « Directrice de thèse », terme très réducteur parce qu'elle est bien plus que cela, ce qui est peut-être la raison pour laquelle elle déteste que je la présente comme tel... ! Cette thèse n'aurait ni commencé ni abouti sans son soutien et son encadrement sans faille. Alors Agnès, merci pour m'avoir fait confiance, pour m'avoir guidée dans le labyrinthe de la thèse, orientée vers les personnes « clés » et ouvert les bonnes portes (fermé les mauvaises aussi !). Au quotidien, merci aussi pour les échanges tant professionnels que personnels, pour les apports en magnésium (sous forme de chocolat, cela va de soit), pour m'avoir équipée en chaussures de marche quand je me suis sentie pieds nus en bas de la montagne « Sainte-Thèse » et enfin pour avoir été présente jusque dans les derniers virages de la ligne que je n'ai jamais vue droite... !

Merci également à mon co-directeur de thèse Gilbert David pour avoir suivi ces travaux avec attention et m'avoir, lors de précédents stages, donné goût à la recherche.

Merci aux membres du jury, pour avoir lu attentivement ce document dans son intégralité et grâce à qui je garderai de ma soutenance le souvenir d'un moment des plus agréables, tant pour la bonne ambiance que pour la qualité scientifique des échanges qui ont suivi. Merci donc à Michel Petit d'avoir accepté d'être à la fois rapporteur et président du jury de cette thèse et d'avoir porté sur mes travaux son œil juste et critique (!). Merci à Maurits Van Den Berg pour son rapport encourageant ainsi que pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer une post-soutenance anglophone au SASRI. Merci à Nicolas Villeneuve pour ses remarques à la fois scientifiques et académiques. Merci également à Pierre Todoroff qui, je l'espère, continuera à faire vivre ces travaux au bénéfice de la filière canne.

Enfin, merci à Bernard Siegmund qui, au-delà d'être un membre invité du jury, a joué un rôle majeur dans la naissance du projet Agridrone et de ma thèse. Merci donc Bernard pour avoir toujours été présent quand j'ai eu besoin de tes conseils, ou de ton bagou légendaire pour appuyer ces travaux d'un point de vue hautement scientifique ou basement pécunier... !

Qu'aurait été cette thèse sans la collaboration précieuse de la filière canne réunionnaise. Je remercie notamment Olivier Pilot (DAF), François Brelle (CTICS) et Jean François Moser (Syndicat des Fabricants de Sucre) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux. Merci aussi à Bernard De Ranchin et Patrick Pariente (ex CPC), Philippe Rondeau (de l'usine du Gol) et Jean Yves Gonthier (de l'usine de Bois Rouge), pour les échanges multiples et fructueux.

Une pensée également pour Jean-Claude Autrey (ex directeur du MSIRI et secrétaire général de l'ISSCT) pour avoir soutenu ce projet de recherche dès sa naissance.

Un grand merci à la Région Réunion pour le financement de ma bourse de thèse.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à la « dream team » du projet Agridrone :

Merci à l'incollable Sylvain Labbé, Petit Robert de la télédétection, Larousse illustré des techniques d'acquisition et des logiciels de traitement d'image, et recueil de bonne humeur à ses heures...

Merci à Bruno Roux, pour son expertise précieuse en acquisition d'images aéroportées, mais également pour les démarrages du drone au lacet de chaussure, et... les moments « Abba » ! J'en profite aussi pour remercier les deux Michel(s), ses associés de l'Avion Jaune.

Merci à Marion Houlès pour m'avoir apporté son aide sur tous les « champs & chantiers » de ma thèse (champs scientifique et technique, champs de canne, chantier de bureau...). Je ne saurai que trop te remercier pour avoir également « porté ma caisse » dans les moments difficiles. Merci donc pour toutes ces compétences et attentions qui rendent la vie d'une thésarde plus douce au quotidien...

Merci à Pascal Degenne, qui en 5 années de collaboration est venu plusieurs fois en mission à la Réunion. Alors Pascal, « mi souhaite a ou plin d'kouraz pou' out thèse », mais je ne me fais aucun souci... Merci pour tes nombreux coups de mains, et ton oreille attentive et réconfortante.

Enfin merci à Stéphane Dupuy pour tous les traitements d'images que je n'aurai jamais pu réaliser seule... !

Par ailleurs, un grand merci à Albert Oliosio pour les brainstormings sur le choix des questions de recherche de cette thèse et pour m'avoir guidée dans la mise en place des protocoles aéroportés et terrain adéquats pour y répondre. Une pensée pour Frédéric Jacob pour m'avoir aidée à percer les mystères des modèles de transfert radiatif...

Merci également à Philippe Déliot et Joel Duffaut pour leur accueil chaleureux dans les laboratoires de l'ONERA et à Luc Labarre pour les conseils sur MATISSE.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement toute l'équipe « canne » du CIRAD qui m'a accueillie à La Réunion comme à Montpellier.

Merci à Jean-François Martiné pour m'avoir aidée à percer les « mystères du roseau sucré ». Plus sérieusement, merci pour ton aide précieuse dans la mise en place de mes protocoles terrain et dans la compréhension des processus physiologiques de la croissance de la canne à sucre.

Christophe Poser....J'ai du mal à trouver les mots pour te remercier, alors je te les enverrai chantés sur un morceau de guitare... ! En tout cas bon courage pour ta thèse, et d'ici à t'appeler « Docteur Poser » j'espère pouvoir t'apporter autant que tu m'as apporté.

Caroline Lejars, merci pour m'avoir toujours suivie et épaulée ainsi que pour ton aide dans la préparation de ma soutenance de thèse. Merci donc pour tous ces « coups » : « ...de main » et de « ...de pouce », mais également « ...de raquette » (de squash...), « ...de blues » (ah la thèse...), « ...de fil », « ...de soleil » (sur le terrain bien sûr...), sans oublier bien sûr les coups « ...dans le nez » (qui permettent de décompresser !), et les coups « ...de cœur » (bises à ta petite Clé Clé).

Toute ma sympathie et un grand merci à Roland Pirot pour m'avoir aidée à installer mon matériel et mes capteurs sur le terrain dans la joie et la bonne humeur.

Merci à Jean-Louis Chopart pour m'avoir guidée dans la rédaction d'article avec rigueur...et patience !

Merci à Philippe Letourmy pour ses compétences en biostatistique (de manière plus pragmatique, pour avoir généré des bi-droits à partir de mes nuages de points pseudo-trapézoïdaux...)

Merci également à Pierre-François Chabaliér et Pierre Langellier pour leur jovialité et leurs conseils d'agronomes aguerris.

Merci enfin à Pascal Marnotte et Florent Maraoux, responsables successifs de l'unité de recherche, pour m'avoir donné les moyens de mener ces travaux à bien.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des techniciens de l'unité qui m'ont apporté leur aide et leur connaissance du terrain sur les parcelles expérimentales du Cirad. Merci donc à Lionel Le Mezo, Mikael Mézino, Michel Jeannette, Dany Deurveilher, Lilian Gauvin, Raymond Nativel, Emmanuel Hoarau, Ludovic Robert et Bernard Mouny.

Merci aussi au « Staff » du Cirad Réunion pour leur aide et leur bonne humeur (Josie Carpanin, Nadège Nanguet, Catherine Ango, Delphine Carandante...etc) et à tous les agents de l'UMR TETIS et de la Maison de la Télédétection, qui de près ou de loin, m'ont aidée au cours de ces trois années. Un clin d'œil à Gérard Lainé au bon souvenir des cours à l'Université...

Merci aux personnes ayant tour à tour partagé mon bureau à La Réunion et à Montpellier. La bise à Caroline Lejars et Marion Houlès (pour ne pas les citer à nouveau) et à Grégory Vignais pour la partie réunionnaise. Merci à Mahmoud Elhajj, Thierry Tormos, Elodie Vintrou (et Claire Marsden souvent dans les parages !) pour toutes les réponses aux questions lancées à la volée dans le bureau des éco-thésards à la MTD (qu'elles soient scientifiques, techniques, ou issues d'un fichier d'énigmes quand la pause s'impose...). Mention spéciale à Elo pour m'avoir aidée à relativiser dans le rush final, et pour tout le reste.

Je tenais également à remercier les amis qui m'ont entourée et supportée (dans tous les sens du terme) au cours de ces trois années. Merci donc à Aurélie Thomassin (pour m'avoir aussi conduite, ou plutôt trainée jusqu'à la salle de soutenance...!), Sophie Marquaille, Valérie Soti, Isabelle Altier, Aurélie Botta, Mika et Marie, Stéphanie, ...etc.

Merci à mes parents pour avoir toujours accepté et soutenu mes choix, mais également pour m'avoir accompagnée dans les moments de doute qui ponctuent la vie d'une doctorante.

Enfin merci à ma sœur Delphine pour avoir égayé ces 3 années de thèse par la naissance de 2 merveilleux enfants : merci à Maeline pour ses répliques cultes (« t'es pas douée tata ») et au petit Nolan qui ne parle pas encore (heureusement pour moi ??).

Résumé

La caractérisation de la distribution spatio-temporelle de l'état hydrique et nutritionnel des cultures constitue un élément clé pour la gestion raisonnée des intrants et les applications en agriculture de précision. Les images à très haute résolution acquises par télédétection dans les domaines optique réflectif et thermique permettent l'obtention d'informations spatialisées sur les paramètres bio-physico-chimiques décrivant l'état des cultures. C'est le thème de recherche de cette thèse qui explore l'utilisation d'un système d'acquisition multispectral aérien, flexible et à bas prix, pour le suivi de l'état des cultures de canne à sucre à l'île de La Réunion. Ces travaux répondent à un double objectif méthodologique, à la fois technologique et agronomique.

La partie technologique a concerné la mise au point d'une chaîne de traitement permettant de passer du signal acquis par un système aéroporté à une grandeur quantifiée et donc comparable dans le temps et l'espace. Le système d'acquisition d'images multispectrales est composé d'un ULM équipé d'appareils photographiques numériques du commerce pour les acquisitions dans le domaine optique réflectif (bleu, vert, rouge, rededge, proche infrarouge) et d'une caméra thermique pour les mesures dans l'infrarouge thermique. Pour convertir le signal acquis en une mesure radiométrique quantifiée, nous avons mis au point des méthodes de correction des distorsions radiométriques d'origine environnementales (éclairage solaire, atmosphère...) ou internes aux capteurs (vignettage, compression d'images) qui affectent les images. Dans l'infrarouge thermique, ces méthodes ont été validées à partir de mesures *in situ* de températures de surface. Dans l'optique réflectif, nous avons examiné l'impact des corrections radiométriques sur la qualité des relations liant des indices spectraux de végétation à des variables biophysiques de surface.

Dans la partie agronomique, nous avons évalué le potentiel de ces mesures multispectrales pour diagnostiquer l'état de stress des couverts de canne. Nous avons montré, à partir de données *in situ* (Crop Water Stress Index empirique sur culture couvrante) et de données aéroportées (Water Deficit Index sur culture partiellement couvrante) la capacité des indices basés sur la température de surface à caractériser l'état hydrique de la canne à sucre. Pour cela nous avons développé des méthodes originales de calcul de ces indices afin de pouvoir les appliquer en milieu humide et sur des plantes présentant un stress croisé (eau * azote). L'état azoté de la culture a pu également être caractérisé à partir du rapport des signaux acquis dans les bandes Bleu et Rouge. Les résultats, en bon accord avec les mesures de terrain (évapotranspiration, couleur des feuilles, humidité de la plante) permettent d'envisager le couplage futur de ces indicateurs d'état avec des modèles agronomiques pour aboutir à un conseil technique adapté.

Abstract

Spatial and temporal characterisation of crop nutrient and water status is of great importance for input management and precision agriculture applications. Very high resolution images remotely-sensed in the spectral and thermal domains provide information about the spatial variation of bio-physical and chemical parameters that describe crop status. This thesis explores the use of a flexible and low-cost airborne multispectral acquisition system for the monitoring of sugarcane crop status in Reunion Island. A dual objective was pursued in this study, both technological and agricultural.

The technological part concerned the development of a processing chain allowing the translation of the signal acquired by the airborne system into quantified values usable for spatial and temporal comparisons. The multispectral image acquisition system was made up of an ultra-light aircraft equipped with commercial digital cameras for acquisition in the blue, green, red, rededge and near infrared bands, and with a thermal infrared camera for surface temperature measurements. In order to convert the acquired signal into a quantified radiometric value, we developed methods for the correction of the environment-dependent (solar radiation, atmosphere) and camera-related (vignetting effects, image compression) radiometric distortions that affect the images. In the thermal infrared band, these methods were validated using *in situ* measurements of surface temperatures. In the other bands, we examined the impact of our radiometric corrections on the quality of the relationships between spectral vegetation indices and surface biophysical variables.

In the agricultural part, we evaluated the potential of these multispectral measurements for the diagnosis of stress in sugarcane crops. Using *in situ* (empirical Crop Water Stress Index on fully-vegetated crops) and airborne (Water Deficit Index for partially-covered canopies) data, we showed the ability of indices based on surface temperature to characterize the water status of sugarcane. This involved the development of original calculation methods of these indices to allow their application in humid conditions and on crops affected by a combined stress (water * nitrogen). The nitrogen status of the crop was also successfully characterised using the ratio of the signals acquired in the Blue and Red bands. The results were in good agreement with field measurements (evapotranspiration, leaf colour, plant humidity), and open the possibility of future coupling of these vegetation status indicators with crop growth models, yielding valuable decision-making tools.

Table des matières

REMERCIEMENTS	4
RESUME.....	7
ABSTRACT	8
TABLE DES MATIÈRES	9
ACRONYMES	11
INTRODUCTION.....	13
I. CONTEXTE DE L'ETUDE : ENJEUX ET ETAT DE L'ART	17
I.1 LA CANNE A SUCRE DANS LE MONDE.....	17
I.2 LA FILIERE CANNE A SUCRE A LA REUNION : PRESENTATION GENERALE ET ENJEUX.....	18
I.3 LES OUTILS D'AIDE A LA GESTION RAISONNEE DES INTRANTS A LA REUNION	20
I.4 LA GESTION DES INTRANTS PAR TELEDETECTION AEROPORTEE	21
I.4.1 <i>Incidence de l'eau et de l'azote sur la culture de la canne</i>	22
I.4.1.1 Incidence de l'eau sur la culture de la canne.....	22
Effets d'un stress hydrique en phase de levée et de tallage	22
Effets d'un stress hydrique en phase de grande croissance	23
Effets d'un stress hydrique en phase de maturation.....	24
I.4.1.2 Incidence de l'azote sur la culture de la canne.....	25
Symptômes de déficience.....	26
I.4.1.3 Effets d'un stress croisé eau * azote	26
I.4.2 <i>Télédétection et stress des cultures</i>	27
I.4.2.1 Les mécanismes et les indicateurs.....	27
Domaine optique réflectif (visible et proche infrarouge)	27
Domaine thermique (IRT)	29
I.4.2.2 Télédétection aéroportée vs. télédétection satellitaire.....	30
II. ACQUISITION DES DONNEES EXPERIMENTALES.....	33
II.1 LES SITES EXPERIMENTAUX.....	33
II.1.1 <i>Parcelle expérimentale de La Mare (suivis 2006 et 2007)</i>	33
II.1.2 <i>Parcelle planteur de Silotia (suivi 2006)</i>	34
II.1.3 <i>Parcelle expérimentale de Tirano (suivis 2007 et 2008)</i>	34
II.2 L'INSTRUMENTATION.....	36
II.2.1 <i>L'instrumentation aéroportée</i>	36
II.2.1.1 Les appareils photographiques numériques.....	36
II.2.1.2 Capteurs thermiques.....	39
II.2.1.3 Système d'acquisition aéroporté	39
II.2.2 <i>Instrumentation in situ</i>	40

II.2.2.1	Radiothermomètres	40
II.2.2.2	Autres appareils de mesure	41
II.3	LES CAMPAGNES EXPERIMENTALES	41
II.3.1	<i>Campagne expérimentale 2006 : mise au point du protocole de mesures</i>	41
II.3.1.1	Suivi de l'essai de La Mare.....	41
II.3.1.2	Suivi de la parcelle de Silotia.....	42
II.3.2	<i>Campagne expérimentale 2007 : Acquisition des données</i>	43
II.3.2.1	Suivi de l'essai de La Mare.....	43
II.3.2.2	Suivi de l'essai de Tirano.....	45
II.3.3	<i>Campagne expérimentale 2008 : Données de validation in-situ</i>	46
III.	PRINCIPAUX RESULTATS	52
III.1	DU SIGNAL A LA MESURE.....	52
III.1.1	<i>Les appareils photographiques numériques</i>	52
III.1.2	<i>La camera thermique</i>	55
III.1.2.1	Etalonnage.....	56
III.1.2.2	Vignettage	56
III.1.2.3	Corrections atmosphériques	57
III.2	DE LA MESURE A L'INDICATEUR.....	59
III.3	DE L'INDICATEUR AU CONSEIL	63
IV.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES OPERATIONNELLES	66
	APPORTS TECHNOLOGIQUES : DU SIGNAL A LA MESURE	66
	APPORTS AGRONOMIQUES : DE LA MESURE A L'INDICATEUR....	67
	APPORTS AGRONOMIQUES : ... DE L'INDICATEUR AU CONSEIL	68
	PERSPECTIVES DE RECHERCHE	69
	PERSPECTIVES OPERATIONNELLES ET VOIES DE TRANSFERT	69
	LISTE DES FIGURES	71
	RÉFÉRENCES	74
	ARTICLES	82
	ANNEXES	160

Acronymes

Capteurs, radiométrie et principaux indices

CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxyde Semi-conductor
CWSI_t	Crop Water Stress Index (théorique)
CWSI_e	Crop Water Stress Index (empirique)
F.O.V	Field of View
FPA	Focal Plane Array
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PIR	Proche Infrarouge
RDG	Rededge
RVB	Domaine visible (Rouge, Vert, Bleu)
SRPI	Simple Ratio Pigment Index
UV	Ultraviolet
VIT	Vegetation Index / Temperature
WDI	Water Deficit Index

Organismes

CERF	Centre d'Essai, de Recherche et de Formation
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CPC	Comité de Pilotage de la Canne
CTICS	Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre
DAF	Direction de l'Agriculture et de la Forêt
FAO	Food and Agriculture Organization
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
ISSCT	International Society of Sugar Cane Technologists
OCM	Organisation Commune de Marché
OMC	Organisation Mondiale du Commerce
ONERA	Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
SASRI	South African Sugarcane Research Institute
SFS	Syndicat des Fabricants de Sucre de La Réunion

Variables

BRIX	(ou degré BRIX) – Unité de mesure du réfractomètre DR-103L (Bellingham+Stanley®) – teneur en matières solubles (dont la plus grosse partie sont des sucres et principalement du saccharose) du jus de la canne (% ou g/100g)
HTVD	Hauteur de la tige de canne à sucre jusqu'à la dernière ligule visible (ou TVD) (cm)

LAI	Leaf Area Index (sans unité)
NBLV	Nombre de Limbes Verts
HUM (SH)	Humidité des gaines (Sheath Humidity)
SPAD	Unité de mesure du Chlorophylle-mètre SPAD-502 (Minolta®) (sans unité)
TVD	Terminal Visible Dewlap (dernière ligule visible)
T_a	Température de l'air (°C)
T_s	Température de surface (°C)
T_c	Température du couvert (°C)
T₀	Température du sol (°C)
H_r	Humidité relative de l'air (%)
ETR	Evapotranspiration réelle (mm.h ⁻¹)
ETM	Evapotranspiration maximale (mm.h ⁻¹)
R_n	Rayonnement net (W.m ⁻²)
R_g	Rayonnement global (W.m ⁻²)
r_a	Résistance aérodynamique (s.m ⁻¹)
r_c	Résistance de la canopée (s.m ⁻¹)
U	Vitesse du vent (m.s ⁻¹)
VPD	Vapor Pressure Deficit (kPa)

Autres

GPS	Global Positioning System
OSIRI	Outil Simplifié pour une Irrigation Raisonnée et Individualisée
PDA	Personal Digital Assistant
ROM	Régions d'Outre-Mer Français
ULM	Ultra-Léger Motorisé

Introduction

Dans les régions d'outre-mer françaises, la culture de la canne à sucre constitue un enjeu socio-économique et de politique locale. C'est particulièrement le cas à La Réunion, où la culture occupe 50 % de la surface agricole utile et assure un grand nombre d'emplois directs et indirects (Lejars and Siegmund 2004). Cependant, compte tenu de la hausse des coûts de production, des possibles baisses de prix d'achat de la canne liées aux négociations de l'OCM Sucre (Fusillier *et al.* 2007) et de la pression urbaine sur les terres cultivées, la filière se voit fragilisée et menacée. La demande des partenaires locaux d'un appui au développement par des actions de recherche est de ce fait très largement exprimée, dans l'objectif d'accroître la productivité de la culture et de réduire les coûts de production. A cela s'ajoute la nécessité de s'assurer de l'utilisation raisonnée des ressources (notamment l'eau) et de la préservation de l'environnement physique et socio-économique. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet de thèse, qui repose sur les principes fondamentaux du concept d'agriculture de précision.

Ce concept de conduite culturale, basé sur l'utilisation de technologies d'acquisition et de traitement de l'information, permet d'identifier la variabilité spatiale et temporelle intra-parcellaire, dans le but d'optimiser la productivité et d'assurer une gestion durable de l'environnement. Cette définition implique une gestion raisonnée de la ressource en eau, mais aussi des intrants (engrais, pesticides, ...etc), par une optimisation spatio-temporelle des apports à la parcelle. Pour arriver à doser correctement ces apports, les besoins nutritifs et hydriques de la culture doivent être déterminés, et les pressions extérieures (mauvaises herbes, parasites, etc) identifiées. Il existe de nombreuses méthodes permettant de caractériser, *in situ*, l'état des cultures. Cependant, celles-ci sont souvent destructives, ou coûteuses en temps et en main d'œuvre.

A ces méthodes classiques de caractérisation de l'état des cultures, les nouvelles technologies telles que la télédétection, couplée aux SIG et à l'utilisation du GPS, offrent une alternative par la possibilité d'effectuer, à l'échelle régionale ou d'une exploitation, des mesures rapides et spatialement exhaustives qui peuvent difficilement être réalisées par des techniques courantes d'échantillonnage au sol.

En télédétection, la littérature fait part de nombreuses études dans lesquelles des capteurs multi- ou hyper-spectraux sont utilisés pour l'estimation de l'état nutritionnel des couverts végétaux à partir des réponses spectrales observées dans les domaines visible, rededge (rouge profond) et proche infrarouge (Filella *et al.* 1995; Filella and Penuelas 1994; Gitelson *et al.* 2005; Inoue and Penuelas 2001). Pour une culture donnée, la détermination des fonctions de transfert entre bandes spectrales et indicateurs d'état nutritionnel se fait généralement via une approche expérimentale. De plus, la qualité de la corrélation entre les paramètres biochimiques de la plante et la réflectance du couvert dans certaines longueurs d'onde est liée à l'état hydrique du couvert végétal (Barnes *et al.* 2000; Osborne *et al.* 2002). Il est donc recommandé de coupler les mesures de réflectance à des mesures d'émittance du couvert dans l'infrarouge thermique. La température de la canopée (T_c) permet en effet d'accéder à l'état hydrique de la plante (Erlher 1973; Jackson 1982; Pinter Jr. *et al.* 1990; Taner

1963), et est à l'origine de nombreux indicateurs de stress hydrique, appliqués essentiellement en milieux arides et semi-arides.

Qu'elles soient issues de capteurs satellitaires ou aéroportés, les images de télédétection peuvent donc apporter de nombreuses informations pour l'aide à la gestion des cultures. De par leur très haute résolution, les images issues de capteurs aéroportés s'avèrent toutefois plus adaptées à l'étude de la variabilité intra-parcellaire et offrent un avantage opérationnel par leur souplesse d'acquisition et leur faible coût.

L'azote et l'eau sont les principaux intrants ayant une influence significative sur la productivité de la culture de la canne (Wiedenfeld 1995). Il y a donc un intérêt certain à suivre de manière régulière et précise l'état hydrique et azoté des parcelles. Effectuer ces suivis par télédétection permet d'apporter une dimension spatiale et ainsi de cartographier des zones homogènes de gestion des apports à la parcelle. Ceci nécessite (i) des images à une résolution suffisante pour l'analyse de la variabilité intra-parcellaire, (ii) de disposer de capteurs permettant de développer des indicateurs sensibles aux stress à mettre en évidence, (iii) de travailler avec des moyens d'acquisition permettant un suivi temporel fin des zones étudiées.

Pour satisfaire à la question de la résolution et du suivi temporel, notre choix s'est porté sur les moyens légers d'acquisition que sont les ULM. Facilement mobilisables, leur vol à faible vitesse permet l'obtention d'images nettes, même à basse altitude, donnant ainsi accès à des images à très haute résolution (~10 cm). Concernant les capteurs, le couplage de données acquises dans les domaines optiques réflectif et thermique, bien documenté dans la littérature, permet le développement d'indices sensibles à l'état hydrique et à la teneur en azote des plantes. L'une des originalités proposées dans cette thèse se trouve dans l'utilisation d'appareils photographiques numériques du commerce (CANON[®] EOS 350D et 400D, à matrice CMOS) pour les acquisitions dans le visible (rouge, vert, bleu), mais également dans le rededge et le proche infrarouge, moyennant quelques modifications de l'appareil. Les données infrarouges thermiques, sont, elles, acquises via l'utilisation d'une caméra thermique embarquée, la miniaturisation récente de tels capteurs permettant leur installation à bord de vecteurs légers.

En complément du projet Agridrone¹ (2006-2008, porté par le CIRAD, et financé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche), l'objectif de cette thèse, est d'étudier les potentialités de la mesure multi-spectrale et thermique aéroportée à partir d'un ULM pour la caractérisation spatio-temporelle de l'état hydrique et nutritionnel de la culture de la canne. Les travaux sont réalisés à l'échelle de la parcelle, dans le but d'optimiser les interventions localisées, l'utilisation des intrants, et d'augmenter la productivité de la culture.

¹ Utilisation de capteurs embarqués sur vecteurs légers (drone et ULM) pour caractériser l'état hydrique, nutritionnel et phytosanitaire des cultures ; application à la culture de la canne à sucre sur l'île de La Réunion.

Ce travail présente donc un défi à la fois technologique et agronomique qui se décline en deux objectifs :

Objectif technologique (du signal à la mesure)

- Identifier les facteurs de perturbation radiométrique dans le processus d'acquisition des images optiques (visible, proche infrarouge et thermique)
- Proposer des méthodes originales de correction radiométrique
- Valider ces méthodes sur des jeux de données relevés sur des parcelles expérimentales par le système léger d'acquisition aéroporté

Objectif agronomique (de la mesure à l'indicateur / de l'indicateur au conseil)

- Tester la capacité d'indices de stress hydrique issus de mesures thermiques *in situ* et aéroportées à caractériser l'état hydrique des cultures de canne à sucre en milieu humide
- Tester la capacité du système d'acquisition optique réflectif et thermique à diagnostiquer séparément les stress hydrique et nutritionnels dans le cas de stress croisés

Les travaux de cette thèse s'articulent autour de l'analyse des données multi-spectrales (visible, rededge, proche infrarouge) et thermiques acquises par les capteurs embarqués, et de leur mise en relation avec des variables descriptives de l'état de la plante, relevées de 2006 à 2008 sur des essais mis en place par le CIRAD à La Réunion. L'approche expérimentale inclue également la récolte *in situ* de données de télédétection dans l'infrarouge thermique pour l'élaboration d'indices de stress hydrique dans la perspective d'un transfert possible de la méthode à la voie aéroportée.

Dans ce document, nous présenterons dans un premier temps le contexte de l'étude, des enjeux aux solutions proposées dans le cadre de ces travaux de thèse pour une meilleure gestion des intrants. La deuxième partie sera consacrée à la présentation des différents sites d'étude, de l'instrumentation (au sol et en vol) et du protocole expérimental. Enfin, sont présentés dans la troisième partie les résumés des 4 articles qui constituent le corps de la thèse en répondant aux questions de recherche précitées :

Deux articles « technologiques » :

Article 1

Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Mallavan, B., Prévot, L., Roux, B., 2008. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. "Sensors", 8(11), 7300-7322; doi:10.3390/s8117300.

Article 2

Lebourgeois, V., Labbé, S., Jacob, F., Bégué, A., 2008. Atmospheric corrections of low altitude thermal infrared airborne images acquired over a tropical cropped area. In "Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium", Boston (USA), 6-11 July 2008, (III) 672-675

Deux articles « agronomiques » :

Article 3

Lebourgeois, V., Bégué, A., Letourmy, P., Martiné, J.F., Houlès, M. Sugarcane crop status diagnosis using airborne-based imaging system in cases of combined water and nitrogen stress. Soumission en avril 2009 à "Field Crops Research"

Article 4

Lebourgeois, V., Chopart, J.L., Bégué, A., Le Mezo, L. Towards the combined use of a thermal infrared water stress index and water balance modelling for irrigation monitoring on sugarcane crop. Soumis en février 2009 à "Agricultural Water Management".

I. Contexte de l'étude : enjeux et état de l'art

I.1 La canne à sucre dans le monde

Essentiellement cultivée pour le sucre qu'elle accumule dans ses tiges, la canne à sucre est également intéressante pour les nombreux co-produits qui sont générés lors de sa transformation. Ainsi, la bagasse peut être brûlée pour la production d'électricité, la mélasse recyclée pour produire du rhum, et les écumes riches en chaux peuvent servir d'amendement aux parcelles plantées.

Avec la diminution progressive des réserves pétrolières, cette culture se voit également fort bien positionnée sur le marché du bio-éthanol, produit par fermentation des sucres contenus dans la plante. Au Brésil par exemple, plus de 50 % de la canne récoltée est ainsi transformée en alcool, produisant près de 150 millions d'hectolitres d'éthanol.

La production mondiale de sucre suit la progression des besoins de consommation qui ont été multipliés par 15 depuis 1900 du fait des augmentations de la population mondiale et de la consommation annuelle par habitant (qui a quadruplé depuis cette date : de 5.1 à 21 kg/habitant/an, Source : FAO, 2005). Cette évolution de la consommation en sucre a été essentiellement assurée par l'accroissement de production de canne, qui a dépassé celle de betterave dès 1918. L'écart entre les deux cultures s'est considérablement creusé, notamment dans les années 60 et 90 (Figure 1) : la canne produit actuellement 75 % du sucre mondial, soit près de 90 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs de canne à sucre sont : le Brésil, l'Inde, la Chine, les Etats-Unis et la Thaïlande. La France est le seul pays de l'Union Européenne, avec l'Espagne, à cultiver la canne à sucre. L'industrie française du sucre de canne est localisée dans 3 régions d'outre-mer : la Guadeloupe et la Martinique aux Antilles, et La Réunion, dans l'Océan Indien. Ils assurent 7 % de la production française de sucre, soit environ 291 800 tonnes (quota fixé par un règlement européen).

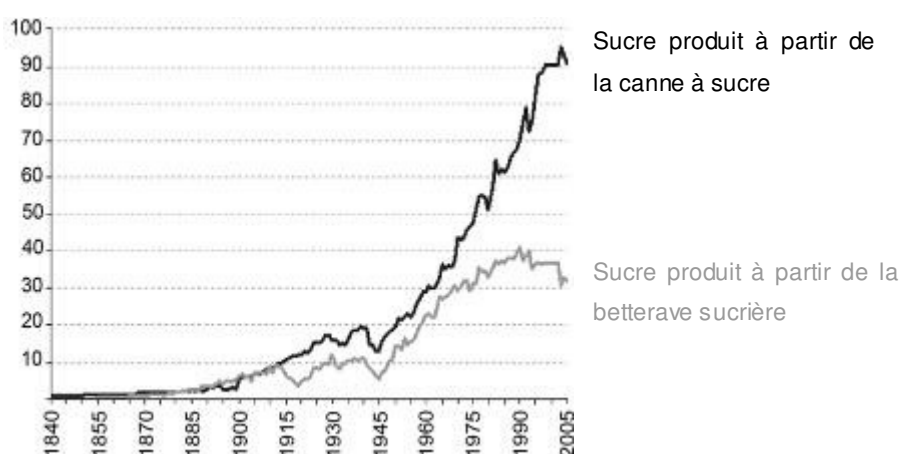


Figure 1 : Production mondiale de sucre en millions de tonnes à partir de la canne à sucre et de la betterave sucrière, de 1840 à 2005 (Source : Secrétariat de la CNUCED d'après les données statistiques du Sugar Trading Manual (2000) et des estimations du Secrétariat).

I.2 La filière canne à sucre à La Réunion : présentation générale et enjeux

La filière canne à sucre à La Réunion compte plus de 4 000 planteurs, pour une surface sous canne d'environ 26 000 ha (source : enquêtes DAF, 2005) soit près de 60 % de la surface agricole utile. Ces surfaces, réparties principalement sur les pentes de l'île (Figure 2), sont cultivées en mode pluvial (80 %) ou irrigué (20 %) en fonction des conditions climatiques de chaque zone de production (cf Annexe 1). Ces aspects climatiques, fortement variables à La Réunion, conditionnent également le choix des variétés cultivées (Annexe 1, Figure 37). Les variétés les plus communes sont la R570 et la R579, créées par le Cerf (Centre d'essai, de recherche et de formation) et présentées en Annexe 1.

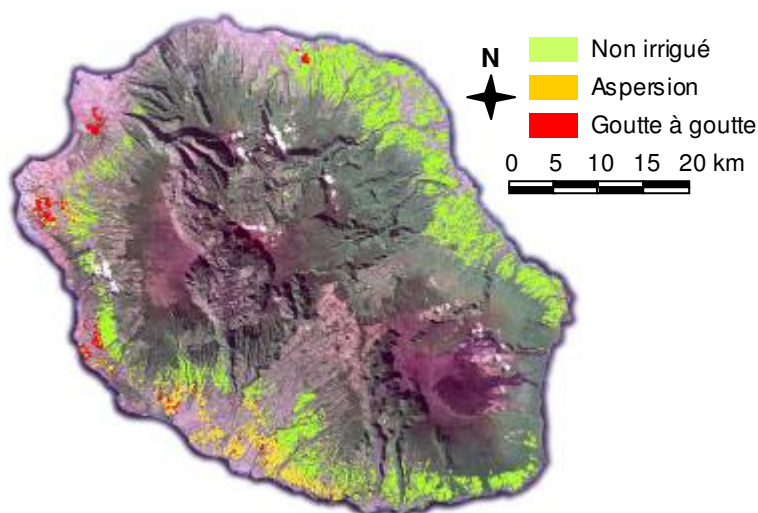


Figure 2 : Surfaces cultivées en canne à sucre et modes d'irrigation (Source : BD parcellaire, DAF 2005, Fond : CNES 2005, distribution Spot Image).

Mises à part quelques grandes plantations, la filière est essentiellement composée de petits planteurs, gérant des exploitations d'une surface moyenne de 6.5 ha (Figure 3).

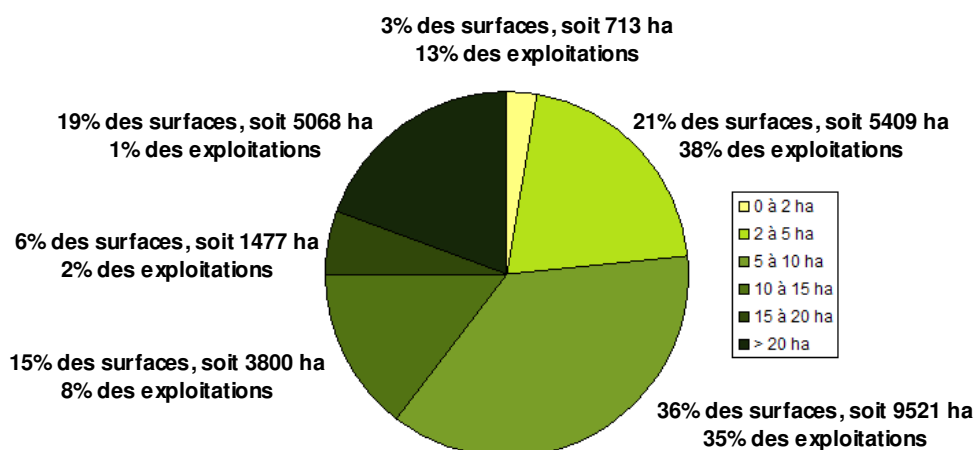


Figure 3 : Classification des exploitations cannières selon leur surface en canne (Source : DAF Réunion, Février 2006).

On comprend alors les difficultés relatives à la gestion de la sole cannière et à l'obtention de données précises concernant l'état des cultures, que ce soit au cours du cycle de croissance ou durant la campagne de récolte. En effet, si la cartographie de la sole cannière est mise à jour chaque année par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, les différents acteurs de la filière sont également à la recherche d'informations concernant l'évolution de l'état des parcelles, afin d'optimiser la productivité de cette culture d'une importance majeure à La Réunion.

Avec 2 millions de tonnes de cannes produites annuellement (Figure 4), soit environ 200 000 tonnes de sucre et 70 000 hectolitres de rhum, La Réunion est la première zone de production de sucre de canne pour la France. Elle réalise les 2/3 des exportations du département (INSEE 2002) et assure également 25 % de la production électrique annuelle de l'île grâce à la combustion de la bagasse.

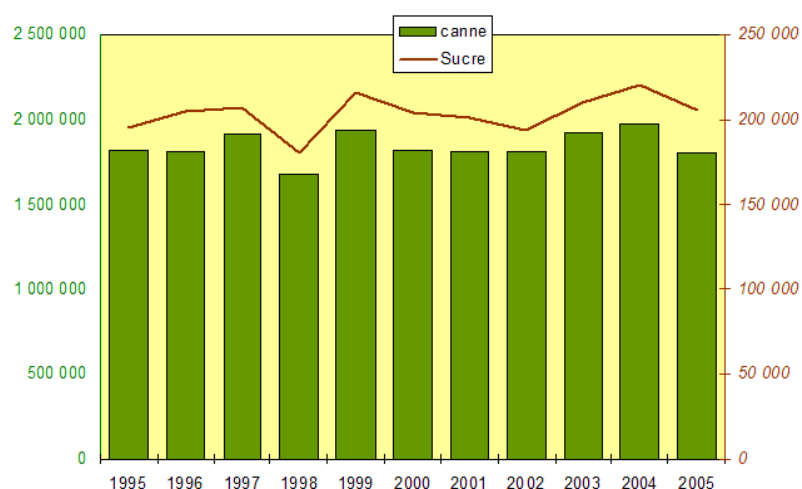


Figure 4 : Evolution du tonnage des cannes traitées et du sucre produit de 1995 à 2005 (Source : Les industriels du Sucre : Sucrière de La Réunion / Sucrerie de Bois Rouge, Dossier de Presse Campagne Sucrière 2005).

Outre son importance sur le plan économique, la filière constitue également à l'échelle de l'île un fort enjeu social et environnemental. Elle génère 12 000 emplois directs et indirects et assure 30 % des revenus des agriculteurs (INSEE, 2002). Elle joue un rôle dans l'aménagement du territoire, contribue à la qualité du paysage et donc à l'attractivité touristique. Sa complémentarité avec les autres productions agricoles de l'île, ou son action anti-érosive sur les sols réunionnais sont d'autres atouts qui font de la canne à sucre une culture multifonctionnelle à La Réunion (Lejars and Siegmund 2004).

Suite à la réforme de l'Organisation Commune du Marché du Sucre de 2006, la filière canne réunionnaise est menacée par une baisse de 36 % du prix d'achat de la canne. Si cette diminution est actuellement compensée par des aides nationales et européennes (Fusillier *et al.* 2007), la filière n'en reste pas moins en sursis, ces aides n'étant garanties que jusqu'en 2013.

Pour assurer la pérennité de la culture de la canne à La Réunion, l'objectif stratégique affiché est d'atteindre les 2.5 millions de tonnes de canne par campagne à l'horizon 2010. Cette augmentation de production pourrait être réalisée par un accroissement des surfaces cultivées ; cependant, depuis les

25 dernières années, on note une diminution puis une stagnation des surfaces plantées (Figure 5). Compte tenu de la rareté du foncier disponible, cette stagnation pourrait perdurer.

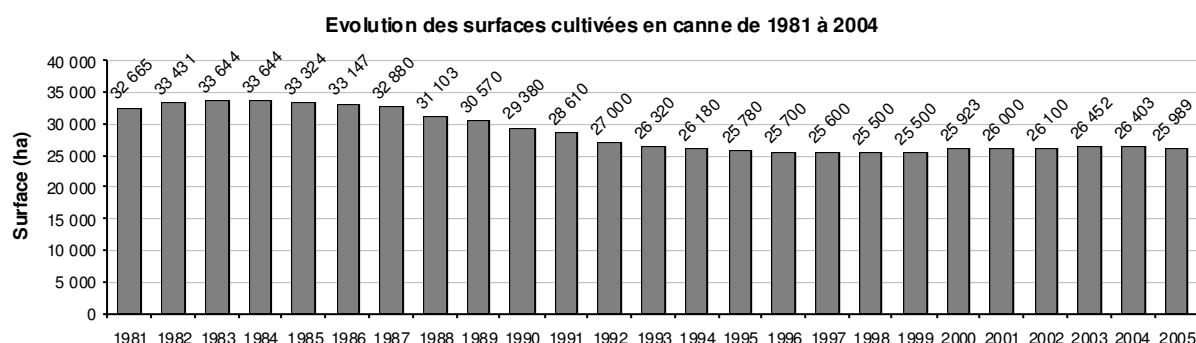


Figure 5 : Evolution des surfaces cultivées au cours des 25 dernières années (Source : CTICS 2005)

Afin d'atteindre les objectifs qu'elle s'est fixée, la filière a donc plus que jamais besoin d'augmenter sa productivité tout en réduisant ses coûts de production. C'est pourquoi elle est demandeuse d'outils de suivi et de diagnostic lui permettant de gérer au mieux sa production.

I.3 Les outils d'aide à la gestion raisonnée des intrants à La Réunion

Parmi les enjeux majeurs cités par la Syndicat des Fabricants de Sucre de La Réunion (Annexe 2) pour diminuer les coûts de production planteur et augmenter le rendement, on trouve (i) l'augmentation de l'efficacité de l'eau, (ii) l'adaptation du référentiel fertilisation. Le premier point implique la mise au point d'outils de conseil à l'irrigation. Le second concerne l'application d'une fertilisation raisonnée de la canne sur la base de la fertilité mesurée du sol de chaque parcelle.

Le CIRAD travaille sur la mise au point d'outils de suivi et de conseil pour une meilleure gestion de l'irrigation et de la fertilisation.

Concernant l'irrigation de nombreuses approches existent pour caractériser l'état hydrique de la culture, afin d'adapter les apports en eau au plus près des besoins réels de la plante. A La Réunion, la grande variabilité des sols et du climat complique l'utilisation des méthodes traditionnelles de conseil à l'irrigation. Certaines de ces méthodes sont basées sur le bilan hydrique du sol, qui inclue des mesures *in situ* coûteuses en temps et en main d'œuvre. D'autres approches nécessitent des mesures destructives (comme la teneur en eau des feuilles ou des gaines), ou des équipements sophistiqués (pour les mesures de flux de sève par exemple) qui présentent le même inconvénient (Jones 2004) et n'apportent qu'une information localisée sur l'état hydrique du champ concerné. Pour pallier à ces limitations, les équipes du CIRAD ont développé OSIRI¹ (Chopart *et al.* 2007), un outil de conseil à l'irrigation adapté à un environnement hétérogène et à des petits agriculteurs. Cet outil, actuellement utilisé sur l'île, est basé sur un modèle de bilan hydrique (PROBE) (Chopart and Vauclin 1990) couplé à des règles de décision simples et compréhensives.

¹ Outil Simplifié pour une Irrigation Raisonnée et Individualisée

Le plan de fertilisation d'une parcelle est quant à lui établi sur la base d'analyses de sol effectuées tous les 4 à 7 ans, ou au minimum à chaque replantation. Les relevés ont lieu en plusieurs points sur la parcelle et les échantillons sont ensuite mélangés. Cette méthode consiste donc à considérer le sol d'une parcelle comme une entité homogène. Les analyses sont réalisées dans les laboratoires du CIRAD et sont enregistrées dans un référentiel permettant de suivre la fertilité de la parcelle et de réajuster les apports minéraux et organiques en fonction des besoins de la plante. Le plan de fertilisation est ainsi optimisé par une meilleure valorisation des réserves du sol (Chabalier *et al.* 2006). Des techniques de suivi in situ permettent également de s'assurer de l'état nutritionnel de la parcelle. C'est le cas de l'analyse foliaire, réalisée si une baisse anormale de rendement est observée. L'amendement à la parcelle est alors réajusté en fonction des carences observées. Le CIRAD teste également l'utilisation d'un chlorophylle-mètre (SPAD 502, Minolta®) dont les mesures sont fortement corrélées à l'état azoté des plantes (El-Shikha *et al.* 2007; Fois *et al.* 2009; Prost and Jeuffroy 2007).

L'irrigation et la fertilisation azotée sont les principaux intrants permettant une augmentation significative de la productivité de la canne à sucre (Wiedenfeld 1995). Ces deux intrants jouent un rôle clé sur le développement de la culture, de sa plantation à sa récolte. Un suivi adapté de l'état hydrique et nutritionnel de la culture constitue donc une information pertinente pour une aide à la gestion raisonnée des apports à la parcelle. Comme nous allons le voir dans la partie qui suit, l'évolution des technologies en télédétection offre aujourd'hui des moyens de suivi et de caractérisation de l'état des cultures, permettant de remplacer ou de compléter les techniques courantes d'échantillonnage au sol, et d'y apporter une dimension spatiale. La connaissance de l'évolution temporelle des variables biophysiques décrivant la croissance et l'état de la culture constitue un pré-requis indispensable pour les suivis effectués par télédétection (Rudorff and Batista 1990; Simoes *et al.* 2005). Avant de traiter de manière plus approfondie les apports de la télédétection pour l'aide à la gestion des intrants, nous aborderons dans un premier temps les aspects éco-physiologiques de la culture, en se concentrant sur les effets liés à la l'irrigation et nutrition de la canne.

I.4 La gestion des intrants par télédétection aéroportée

Dans cette partie sont détaillées les conséquences d'un stress hydrique et azoté sur les variables biophysiques d'un couvert de canne à sucre décrivant l'état de la culture. La connaissance de ces variables peut servir à moduler un certain nombre d'opérations culturales permettant ainsi d'augmenter la productivité de la culture. Leur estimation par télédétection, via le calcul d'indicateurs issus de mesures multi-spectrales et thermiques est étudiée depuis de nombreuses années, le plus souvent dans le cas de stress mono-factoriels (azote ou hydrique). La difficulté étudiée ici réside dans le diagnostic du stress, c'est-à-dire l'identification de sa cause, entre stress nutritionnel et stress hydrique.

I.4.1 Incidence de l'eau et de l'azote sur la culture de la canne

La morphologie de la canne à sucre (*Saccharum Officinarum* L.) et les pratiques culturales qui lui sont associées à La Réunion sont présentées en annexes 3 et 4. Ne sont détaillés dans cette partie que les effets de l'eau et de la nutrition sur la culture, sujets de notre étude.

I.4.1.1 Incidence de l'eau sur la culture de la canne

Il faut environ 200 tonnes d'eau pour produire une tonne de canne (Hainzelin 1999). La quantité d'eau réellement utilisée dans l'édification de la plante (matière sèche : hydrates de carbone) est cependant très faible puisqu'elle ne correspond qu'à 0.2 % de l'eau absorbée (Van Dillewijn 1960). En moyenne, 1 % de l'eau absorbée est incorporée pour l'édification des tissus (0.2 %) et le maintien de la turgescence (0.8 %), et le reste est perdu par transpiration (99 %). Ce mécanisme, qui sert au maintien de l'équilibre hydrique des végétaux, est essentiel pour le fonctionnement de la plante. Il permet entre autres la régulation de la température foliaire et facilite l'absorption des éléments nutritifs par les racines et la migration de ces éléments dans la plante.

En situation de déficit hydrique, afin de limiter ses pertes en eau, la plante ferme ses stomates (Tardieu and Dreyer 1997). Ce phénomène, rapide et réversible va entraîner au sein de la plante, des modifications physiologiques par (i) une diminution de la transpiration, (ii) une réduction de la photosynthèse, du fait d'une entrée en CO₂ limitée, (iii) une augmentation de la température foliaire. Des déficits hydriques plus longs peuvent par la suite également induire des changements irréversibles, notamment au niveau morphologique, par la réduction de la surface transpirante (surface foliaire) entraînant une baisse de la production de biomasse.

Les besoins en eau diffèrent selon le stade de croissance de la canne (évolution de l'état de la surface transpirante : LAI) et suivant la demande climatique (évapotranspiration potentielle : ETP) . Selon son intensité et sa date d'apparition dans le développement de la plante, le stress hydrique aura donc des conséquences différentes, pouvant entraîner, ou non, une perte de qualité et de rendement.

Effets d'un stress hydrique en phase de levée et de tallage

Un déficit en eau survenant au début de la mise en place du couvert, correspondant à l'émission des tiges primaires (levée), entraîne un ralentissement important de leur apparition, pouvant être préjudiciable au rendement final (Langellier 1990). Les apports en eau au début de la phase de levée puis de tallage (émission des tiges secondaires), après la plantation ou en début de repousse, doivent donc être réguliers, ce qui est souvent le cas à La Réunion puisque cette phase intervient en période des pluies. Par la suite, un stress hydrique après mise en place des tiges primaires et avant couverture totale accélère la sénescence des jeunes tiges destinées, de toute façon, à disparaître (Martiné 1997). Cet effet n'est donc pas préjudiciable tant qu'il n'affecte pas la croissance des tiges primaires (Gaudin 1999). C'est ce qu'illustre la Figure 6, dans laquelle on peut observer, à la fin de la

période de tallage, que le nombre de tiges par m² est identique entre les cannes cultivées en régime pluvial et celles cultivées sous irrigation dans une zone peu pluvieuse de l'île.

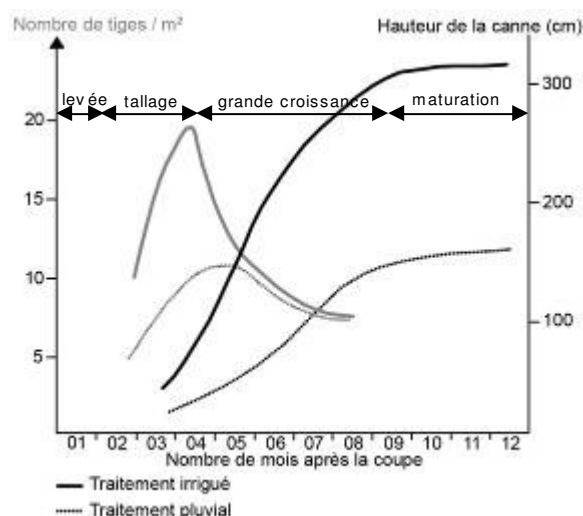


Figure 6 : Tallage et élancement de la canne au cours du cycle d'une repousse (Langellier 1990). Les données ont été collectées à La Réunion, station de Ligne Paradis, pluviométrie annuelle de 1 000 mm, altitude 180 m.

Effets d'un stress hydrique en phase de grande croissance

Durant la période de grande croissance (qui débute en fin de période de tallage), lorsque les racines ne parviennent plus à satisfaire les besoins en eau de la plante, celle-ci atteint temporairement un nouvel équilibre hydrique en stoppant sa transpiration par la fermeture des stomates, entraînant une augmentation de la température foliaire. Ce mécanisme est également valide à l'échelle de la canopée (Idso and Baker 1967) dont la température T_c augmente également.

Si le stress hydrique est faible, la croissance des organes et l'accumulation de biomasse ne sont pas affectées. Elles ne le seront que si le déficit perdure et devient plus sévère (Martiné 1997 et 1998). On observera alors une diminution de la croissance en volume des feuilles et des tiges et une baisse de l'accumulation de biomasse.

Si le déficit hydrique se prolonge, la sénescence des feuilles les plus âgées va s'accroître et provoquer un assèchement rapide des tiges usinables. Ces effets entraînent une diminution de l'indice foliaire et une augmentation de la richesse en sucre par assèchement, sans qu'il y ait accumulation préférentielle de sucre.

Les effets d'un stress hydrique sur l'indice foliaire en période de grande croissance ont été étudiés par Smit and Singels (2006). Les résultats sont présentés en Figure 7. Ils mettent en évidence une très forte diminution du LAI après 40 jours d'arrêt d'irrigation.

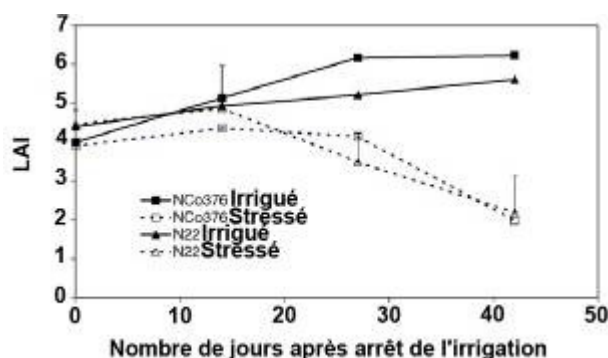


Figure 7 : Evolution LAI pour 2 cultivars en replantation, et 2 traitements (irrigué / sec). Le traitement « sec » correspond à un arrêt de l'irrigation qui a débuté 5 mois après la plantation (adapté de (Smit and Singels 2006)).

Martiné (1999) a également étudié les effets d'un stress hydrique prononcé suivi d'une remise en eau en phase de grande croissance sur l'humidité des différents organes de la canne. Les résultats montrent un assèchement sensible des organes de soutien et de transport que sont les tiges usinables (-7 %) et les gaines vertes (-6 %). Après la remise en eau, la remontée de l'humidité est la plus importante dans les gaines vertes, montrant la sensibilité de cet organe à l'état hydrique de la plante (Figure 8).

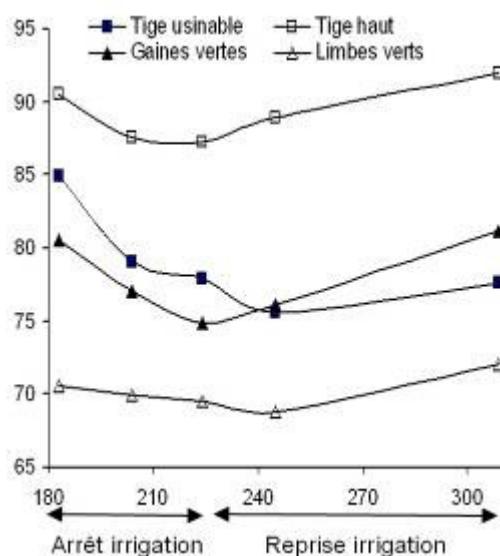


Figure 8 : Evolution de l'humidité (%) de différents organes selon l'âge (jours après coupe), au cours d'un arrêt de l'irrigation puis d'une remise en eau en période sèche. D'après (Martiné 1999)

Durant la phase de grande croissance, un stress hydrique aura donc une influence sur l'indice foliaire (LAI), la croissance des tiges (longueur des entre-nœuds) et la biomasse. Par conséquent, la phase de grande croissance (entre 4 et 9-10 mois) constitue la phase la plus critique vis-à-vis de l'eau.

Effets d'un stress hydrique en phase de maturation

Les besoins en eau au cours de la phase de maturation sont contraires à ceux de la phase de grande croissance. Avant la récolte, le stress hydrique permet d'accroître la concentration en sucre en

réduisant d'abord l'humidité des tiges puis leur croissance au profit du stockage de sucre (Robertson *et al.* 1999). Il y a alors maturation induite par le stress. Cependant, un tel stress ne doit pas se prolonger dans le temps. En effet, lorsque l'alimentation hydrique de la plante est suspendue ou très réduite, la photosynthèse l'est également et se traduit par la fermeture des stomates. La survie de la plante est alors maintenue grâce à la consommation de sa réserve en sucres par respiration. Le sucre est alors remobilisé et la croissance repart.

En phase de maturation, l'irrigation est donc généralement rationnée, voire suspendue un à deux mois avant la récolte, et la canne puise dans les réserves en eau du sol. Dans les zones où la canne est cultivée en mode pluvial, la maturation se fera en fonction de la pluviométrie, généralement plus faible au cours de cette phase, qui intervient en début de saison fraîche et sèche (Annexe 4, Figure 41).

1.4.1.2 Incidence de l'azote sur la culture de la canne

Les besoins de la canne en éléments minéraux sont très importants, car liés à la forte densité de végétation aérienne de cette culture. L'azote est la composante principale de l'amendement nutritif apporté à la plante. Il détermine le niveau de rendement si les conditions d'alimentation hydrique sont adéquates. Son rôle est prépondérant dans la croissance et le développement de la plante. Le risque de sur-utilisation, engendrant une pollution des sols et des nappes, est de ce fait très fort.

La phase intense d'absorption de N se situe entre trois à six mois après la coupe, à raison de 4 à 6 kg de N/ha/jour (Chabalier *et al.* 2006). Les apports à la parcelle ont donc généralement lieu un à trois mois après la coupe.

L'azote influence la composition et le développement de la canne à bien des égards. L'apport d'engrais azotés aura ainsi une influence positive sur la teneur en humidité des cannes (Borden 1944), le peuplement en tiges (Van Dillewijn 1960) ou encore l'allongement de la canne (Das 1936). En début de cycle, une augmentation de la quantité d'azote apportée induira également immédiatement une hausse de la concentration en azote dans toutes les parties de la canne, mais plus particulièrement dans les tissus foliaires (Wiedenfeld 1995). Elle aura sur la feuille des conséquences :

- structurales : les feuilles deviennent plus larges, le taux de formation de nouvelles feuilles est accru (Das 1936) et l'indice foliaire augmente ;
- biochimiques : leur couleur devient vert plus foncé, et la teneur en chlorophylle des feuilles augmente (Borden 1944).

L'état azoté de la plante peut donc être évalué à partir de la concentration en azote des feuilles (notée [N]) ou de leur contenu en chlorophylle à certains stades du développement de la culture (Baret 1999). En fin de cycle, la concentration en azote des feuilles diminue (Figure 9). Une quantité excessive d'azote disponible en période de maturation aura d'ailleurs un impact négatif sur le rendement final en sucre (Borden 1948; Chapman 1994; Hurney 1984; Samuels 1965; Stevensen *et al.* 1992; Wood 1990). Réalisé dans les derniers mois du cycle de croissance, l'estimation de la concentration en azote [N] peut donc permettre d'évaluer le degré de maturité de la canne.

La capacité d'absorption de l'azote, et donc les taux d'azote foliaires, diffèrent selon les variétés. A La Réunion, par exemple, les variétés R570 et R579 ont des teneurs en N assez proches, plus élevées que celle de la variété R575 (Pouzet *et al.* 2007).

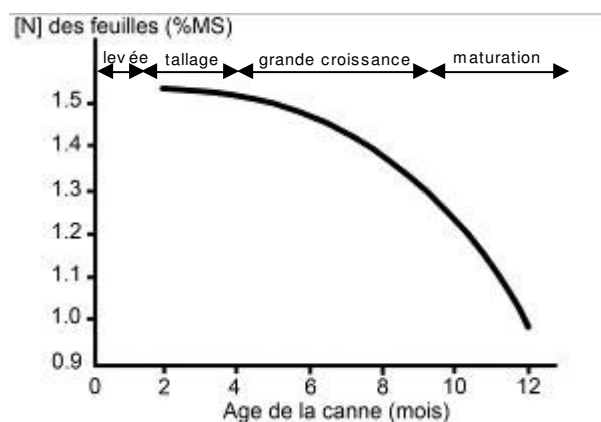


Figure 9 : Evolution de la concentration en azote des feuilles (exprimée en % de matière sèche) pour une culture de canne à Porto Rico (adapté de (Fauconnier and Bassereau 1970)).

Symptômes de déficience

Les effets d'un stress azoté sur la canne sont nombreux et peuvent avoir des conséquences non négligeables sur la croissance et le rendement.

S'il survient en début de croissance, le stress azoté aura pour conséquence une réduction de l'émission des tiges, et donc du tallage. Par la suite, une canne manquant d'azote verra la croissance de ses tiges primaires diminuer (baisse de la longueur des entre-nœuds et du diamètre de la tige).

La croissance des feuilles est également affectée et le rapport entre largeur et longueur des feuilles décroît. Les feuilles sont donc plus étroites et l'indice foliaire (LAI) diminue. Leur couleur vire au jaune et l'on observe un dessèchement prématuré de la pointe et du bord des feuilles. La couleur des feuilles les plus vieilles tourne au violet-rougeâtre (Clements *et al.* 1941; Martin 1934; Van Dillewijn 1960). Ce phénomène s'accompagne d'une baisse importante de la teneur en chlorophylle et en azote de la plante, et plus particulièrement des tissus foliaires.

*1.4.1.3 Effets d'un stress croisé eau * azote*

La réponse de la canne à sucre aux apports azotés peut-être très affectée par la ressource en eau disponible. De nombreuses études font part des conséquences de stress croisés eau * azote sur la culture. Pour Bose and Thakur (1977), la réponse de la plante à un apport azoté peut être masquée, voire rendue inefficace en cas de stress hydrique. Samuels (1965) rapporte qu'un approvisionnement modeste en azote suffit pour obtenir des rendements élevés lorsque la canne est irriguée, tandis qu'un apport beaucoup plus conséquent est nécessaire pour produire des rendements élevés lorsque la plante n'est pas irriguée. Ingram and Hilton (1986) ont montré que l'efficacité de l'utilisation des engrais par la canne à sucre est plus grande pour des plantes correctement irriguées, et que de

même, l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la plante est plus élevée lorsque celle-ci a reçu une quantité de fertilisant adaptée.

Si les apports en eau sont limités, la canne à sucre ne peut donc pas tirer profit de la disponibilité, même accrue, en azote (Wiedenfeld 1995). L'azote détermine donc le niveau de rendement si les conditions d'alimentation en eau sont par ailleurs suffisantes (Chabalier *et al.* 2006).

On a pu voir dans cette partie qu'un stress, nutritionnel ou hydrique, a plus ou moins d'impact selon le stade phénologique de la culture. Ainsi la phase de grande croissance (3 – 9 mois) apparaît comme étant la plus critique vis-à-vis de l'eau et de l'azote. Les interactions entre l'azote et la disponibilité en eau apparaissent également comme complexes avec des conséquences qui peuvent être importantes sur le rendement final.

I.4.2 Télédétection et stress des cultures

Cette partie constitue une introduction générale des concepts (mécanismes et indicateurs) permettant l'utilisation de la télédétection pour l'étude des stress des cultures. Les indicateurs utilisés dans ces travaux sont présentés de manière plus approfondie dans les introductions des quatre articles constituant le corps de cette thèse.

I.4.2.1 Les mécanismes et les indicateurs

Qu'elles soient issues d'images satellitaires, aéroportées, ou bien de capteurs installés *in situ*, les données acquises par télédétection peuvent apporter de nombreuses informations sur l'état hydrique et nutritionnel des plantes.

De nombreuses études, utilisant des données spectrales et thermiques ont ainsi abouti au développement d'indices permettant d'accéder à l'état nutritionnel (Daughtry *et al.* 2000; El-Shikha *et al.* 2008; Gitelson *et al.* 2003; Gitelson *et al.* 2005; Haboudane *et al.* 2002; Sripada *et al.* 2006; Thomas and Gausman 1977) et hydrique (Clawson and Blad 1982; Erher 1973; Gardner *et al.* 1981; Idso 1982; Jackson *et al.* 1981; Jackson *et al.* 1977; Moran *et al.* 1994; Taner 1963) des cultures.

Domaine optique réflectif (visible et proche infrarouge)

A l'échelle de la feuille (Figure 10.a), la fraction de lumière réfléchi dans le domaine visible est principalement influencée par la présence de pigments chlorophylliens dans les tissus foliaires, dont la concentration est fortement corrélée à la teneur en azote de la feuille (Haboudane *et al.* 2002). Les chlorophylles *a* et *b* absorbent ainsi la lumière dans les portions rouge (~670 nm) et bleu (~450 nm) du spectre visible, et la réfléchissent faiblement (réflectance aux alentours de 0.2) dans le vert (~550 nm) (Carter and Knapp 2001; Gates *et al.* 1965), permettant ainsi de caractériser l'état chlorophyllien de la

plante. Dans le proche infrarouge (PIR), la réflectance¹ est influencée par la structure cellulaire de la feuille, entraînant une réponse élevée (~ 0.6) pour les végétaux en bonne santé. Enfin, le rededge (RDG) (entre 680 et 750 nm), qui correspond à la pente de réflectance située entre le rouge et le PIR change de forme et de position quand la plante subit un stress, notamment azoté (Barnes *et al.* 2000; Filella and Penuelas 1994; Horler *et al.* 1983).

A l'échelle de la canopée (Figure 10.b), la réflectance est une combinaison des réponses spectrales du sol et de la végétation considérée, qui dépend notamment du taux de couverture et de la quantité de feuilles (LAI), et évolue donc de manière dynamique en fonction du stade phénologique de la plante. L'utilisation d'indices de végétation, basés sur des combinaisons de bandes spectrales dans le visible et le proche infrarouge, fournit une méthode simple pour extraire la réponse de la végétation à partir de spectres complexes de canopée (Pinter Jr. *et al.* 2003). L'indice le plus communément utilisé est le NDVI² (Normalized Difference Vegetation Index) développé par Rouse *et al.* (1973) et calculé à partir des réflectances observées dans les bandes rouge et le proche infrarouge. Indicateur de l'activité chlorophyllienne du couvert, il est à la fois sensible à la teneur en pigments foliaires (traduisant la capacité d'absorption du rayonnement intercepté) et à la structure du couvert (traduisant la capacité d'interception du rayonnement) (Bégué *et al.* 2009). Il permet ainsi l'estimation de l'état général des cultures et des paramètres décrivant leur croissance tels que le LAI (Leaf Area Index) ou le taux de couverture (V_c). Le NDVI tend cependant à saturer pour des valeurs de LAI dépassant 3-4 (Carlson and Ripley 1997; Sellers 1985), lorsque le taux de couverture (V_c) atteint 100 %. La relation entre le LAI ou V_c et le NDVI peut également être affectée par des variations de teneur en chlorophylle des feuilles (Haboudane *et al.* 2004).

Les indices spectraux de végétation utilisant des bandes larges tels le NDVI, ou le SR³ (Jordan 1969) communément utilisés pour accéder à l'état de santé ou de vigueur des plantes, sont cependant peu adaptés au diagnostic de stress particuliers, comme par exemple les stress nutritionnels. Le GNDVI⁴ (Gitelson *et al.* 1996), constitue une exception pour sa plus forte sensibilité à la chlorophylle. Les indices utilisant des combinaisons de bandes spectrales étroites apparaissent tout de même plus pertinents pour cette application. Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure de la lumière réfléchie par les feuilles et la canopée des cultures dans le visible peut être utilisée pour estimer leur concentration en chlorophylle, et par conséquent leur état azoté (Haboudane *et al.* 2002). De nombreux indices hyperspectraux, basés sur des rapports de bandes spectrales étroites données dans le visible sont ainsi sensibles aux changements d'état chlorophyllien et azoté des couverts végétaux (Carter and Miller 1994; Daughtry *et al.* 2000; Gamon *et al.* 1992; Penuelas *et al.* 1995b). C'est le cas par exemple du SRPI⁵ (Simple Ratio Pigment Index) (Penuelas *et al.* 1995b), du NPCI⁶ (Normalized Pigment Chlorophyll Index) (Penuelas *et al.* 1994), ou encore du MCARI⁷ (Modified

¹ Rapport du flux radiatif réfléchi par un milieu matériel au flux radiatif incident.

² $NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$, où R et PIR sont les réflectances dans les bandes rouge et proche infrarouge respectivement.

³ $SR = \frac{PIR}{R}$, où R et PIR sont les réflectances dans les bandes rouge et proche infrarouge respectivement.

⁴ $GNDVI = \frac{PIR - V}{PIR + V}$, où V et PIR sont les réflectances dans les bandes verte et proche infrarouge respectivement.

⁵ $SRPI = \frac{p_{430nm}}{p_{680nm}}$, où p est la réflectance.

⁶ $NPCI = \frac{(p_{680nm} - p_{430nm})}{(p_{680nm} + p_{430nm})}$, où p est la réflectance.

⁷ $MCARI = [(p_{700nm} - p_{670nm}) - 0.2 * (p_{700nm} - p_{550nm})] * (p_{700nm} / p_{670nm})$, où p est la réflectance.

Chlorophyll Absorption Reflectance Index) (Daughtry *et al.* 2000). Le rededge est également à la base d'indicateurs de contenu en chlorophylle des plantes (Filella and Penuelas 1994; Hare *et al.* 1984). Afin de prendre en compte les facteurs (comme le taux de couverture, l'âge de la plante ou l'angle foliaire) pouvant altérer le rapport entre le signal acquis à l'échelle de la canopée et les propriétés spectrales de la cible, Barnes *et al.* (2000) ont aussi récemment développé le CCCI (Canopy Chlorophyll Content Index), indice conçu pour fournir une mesure plus précise de l'état azoté de la canopée. Cet indice est basé sur une approche bidimensionnelle (Clarke *et al.* 2001) utilisant le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) comme évaluation du taux de couverture, et le NDRE¹ (Normalized Difference Red Edge) comme mesure de la concentration en chlorophylle des feuilles ou de leur état azoté (Barnes *et al.* 2000).

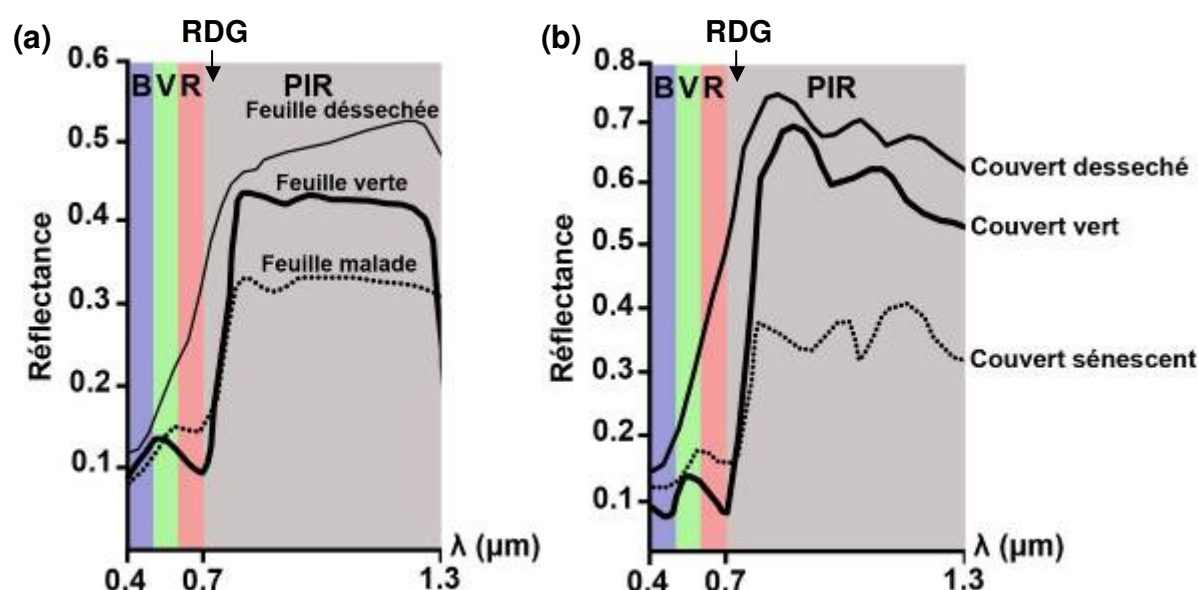


Figure 10 : Variations de la réflectance d'une feuille (a) et d'un couvert (b) selon l'état physiologique dans le visible (B, V, R : Bleu, Vert, Rouge), et dans le proche infrarouge (PIR) (adapté de (Girard and Girard 1999))

Domaine thermique (IRT)

Dans l'infrarouge thermique, c'est la part de rayonnement émis par les surfaces qui est mesurée. La loi de Stefan-Boltzman² démontre que l'émission d'un corps noir est fortement dépendante de sa température élevée à la puissance 4. Il en est de même pour les surfaces naturelles, communément appelées « corps gris », pour lesquelles la loi de Stefan-Boltzman intègre la notion d'émissivité³. Pour la végétation, l'émissivité varie généralement entre 0.95 et 0.99. Elle est donc très proche de 1.

La température de la canopée (T_c) est depuis longtemps reconnue comme étant liée à la teneur en eau des plantes (Erlher 1973; Jackson *et al.* 1977; Taner 1963). Les mesures effectuées dans

¹ NDRE = $\rho_{790nm} - \rho_{720nm} / \rho_{790nm} + \rho_{720nm}$, où ρ est la réflectance.

² $M_b = \sigma T^4$ où M_b est l'exittance du corps noir ($W.m^2$), T est la température du corps noir (K), et σ est la constante de Stefan Boltzmann, égale à $5.67032 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$.

³ $M = \epsilon \sigma T^4$, où M est l'exittance ($W.m^2$) et ϵ l'émissivité du corps gris qui traduit la capacité du corps gris à réémettre l'énergie qu'il absorbe (par rapport à un corps noir qui lui, réémet la totalité de l'énergie absorbée).

l'infrarouge thermique sont ainsi à l'origine de nombreux indices d'état hydrique des cultures. Certains, comme le Stress Degree Day (SDD) (Idso *et al.* 1977; Jackson *et al.* 1977), le Canopy Temperature Variability (CTV) (Clawson and Blad 1982) ou le Temperature Stress Day (TSD) (Gardner *et al.* 1981), ont été proposés pour l'aide à la gestion de l'irrigation. L'indice le plus utilisé dans cette application est le Crop Water Stress index (CWSI) (Idso *et al.* 1981; Jackson *et al.* 1981) qui prend en considération les conditions météorologiques ambiantes influençant également la température de la canopée. Parce qu'elle nécessite la mesure de trois variables uniquement (T_c , T_a , VPD), la version empirique de cet indice (Idso *et al.* 1981) a connu plus de succès dans des applications opérationnelles que sa version théorique (Jackson *et al.* 1981) qui nécessite des mesures supplémentaires de rayonnement net (R_n), de vitesse du vent (U) et l'estimation de la résistance aérodynamique (r_a). La version empirique du CWSI ($CWSI_e$) apparaît cependant comme plus adaptée en climat aride ou semi-aride, qu'en milieu humide où les résultats sont contrastés (Jones *et al.* 1997). L'application du CWSI à partir de mesures de température de surface acquises par voie satellitaire ou aéroportée est également restreinte aux cultures couvrantes de manière à ce que la température mesurée soit celle de la canopée (T_c) (i.e. sans influence de la température du sol T_0). Pour pallier à cette limite, Moran *et al.* (1994) ont développé le concept du trapèze, basé sur l'utilisation combinée d'un indice de végétation, représentant le taux de couverture de la culture étudiée, et de mesures de température de surface (T_s - qui représente alors une température composite du sol et de la canopée). Basé sur ce concept Moran *et al.* (1994) ont introduit le WDI (Water Deficit Index) pour l'estimation du stress hydrique dans le cas de végétations partiellement ou totalement couvrantes.

1.4.2.2 Télédétection aéroportée vs. télédétection satellitaire

En télédétection, chaque système « vecteur – capteur » peut être caractérisé par une résolution spectrale (nombre et largeur des bandes), spatiale (taille du pixel de l'image) et temporelle (fréquence de revisite). L'ensemble de ces caractéristiques détermine ainsi les potentialités du système pour des applications opérationnelles données d'aide à la gestion des cultures.

La gestion des intrants nécessite un suivi régulier dans le temps, ainsi que des images à haute résolution, de manière à accéder à la variabilité spatiale pouvant être observée à l'intérieur même d'un champ et ainsi délimiter des zones de gestion homogènes. Selon Moran (2000) et Moran *et al.* (2003), les spécifications d'un tel système doivent inclure notamment une résolution spatiale de 2 à 5 m, une fréquence d'acquisition de un à trois jours et une précision de géoréférencement d'un pixel.

Comme nous l'avons vu précédemment, la détection de stress hydriques et nutritionnels est basée sur des faibles variations (i) des réflectances observées dans le visible et le proche infrarouge, (ii) de la température de surface. L'incertitude sur les mesures de réflectance ne doit donc pas dépasser 0.01 comme suggéré par Pinter Jr *et al.* (1990), et 1 °C pour les mesures de température de surface (Kimball *et al.* 1999). Ceci implique l'utilisation (i) de capteurs optiques et thermiques radiométriquement calibrés, (ii) de techniques de correction du bruit lié à la présence de l'atmosphère entre le capteur et la cible considérée.

Les capteurs optiques satellitaires sont de plus en plus équipés de sources de référence radiométrique permettant l'obtention d'images en réflectance au sommet de l'atmosphère (réflectance TOA : Top Of Atmosphere). Pour l'obtention de produits en réflectance au sommet de la canopée (TOC : Top Of Canopy), la seconde étape consiste en une correction des effets atmosphériques, ce qui nécessite l'utilisation combinée de modèles de transfert radiatif et de données difficilement accessibles décrivant la composition de l'atmosphère au moment des acquisitions. C'est pourquoi sont de plus en plus proposées des méthodes de calibration relative (ou normalisation radiométrique) basées sur l'utilisation de cibles invariantes (El Hajj *et al.* 2008). Ces méthodes permettent de réduire les distorsions radiométriques (liées aux conditions atmosphériques, à l'éclairement solaire ou à l'angle de vue) sur les séries temporelles d'images afin de les rendre comparables entre elles. De même, les données thermiques acquises par satellite sont grandement affectées par le bruit atmosphérique et les corrections proposées à ce jour permettent l'obtention de données avec une précision de 1 à 3 °C (dépendant de la température de la cible observée) pour le radiomètre ASTER (Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) (Fusijada 1998), ou 1.5 °C pour la bande 6 (thermique) du capteur Landsat ETM+ (Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus) (Schott *et al.* 2001). Bien que la précision des mesures effectuées par ces capteurs thermiques satellitaires s'approche des recommandations précédemment citées pour les applications de suivi des cultures, ces données se voient limitées par leur résolution spatiale (90 m pour ASTER, 60 m pour la bande 6 de Landsat).

Les capteurs embarqués sur des plateformes aéroportées ont l'avantage de minimiser les effets atmosphériques sur les images acquises dans le domaine optique réflectif en travaillant sous la masse atmosphérique (Moran *et al.* 2003). Ils fournissent également des images dont la haute résolution spatiale est adaptée aux suivis opérationnels des opérations culturales. Afin de combler l'absence de capteurs orbitaux dédiés aux applications de gestion des cultures et d'assurer une solution peu coûteuse, la communauté scientifique travaille depuis une dizaine d'années sur la mise au point de systèmes d'acquisition multispectraux (Everitt *et al.* 1995) et superspectraux (Escobar *et al.* 1998) basés sur l'utilisation de capteur CCD (charge-coupled-device) équipés de filtres passe-bande plus ou moins étroits. Grâce à l'évolution des technologies infrarouge thermique, nous avons aujourd'hui accès à des caméras thermiques offrant une taille d'image acceptable pour l'étude de la variabilité intra-parcellaire (320 * 240 pixels), ainsi qu'une précision radiométrique relative de 0.1 °C. La miniaturisation récente de ce type de caméra permet également leur installation à bord de vecteurs légers. Cependant, la correction des effets atmosphériques sur les images thermiques reste nécessaire, même lorsque qu'elles sont acquises par voie aéroportée, à basse altitude (Sugiura *et al.* 2007).

Points-clés du chapitre I

- L'intérêt d'un suivi spatio-temporel fin de l'état hydrique et nutritionnel des cultures de canne à sucre à La Réunion dans le but d'augmenter leur productivité.
- L'influence de l'eau et de l'azote sur les paramètres structuraux (développement foliaire, taux de couverture, LAI) et biochimiques (couleur des feuilles, humidité des tissus, concentration foliaire en chlorophylle et en azote) de la canopée de la culture de la canne à sucre.
- Les mécanismes physiques permettant le développement d'indices pour le suivi des stress des cultures par télédétection : (i) l'importance des données acquises dans le domaine optique réflectif pour le suivi de l'état nutritionnel de la plante, (ii) des données acquises dans l'infrarouge thermique (températures de surface T_s et de la canopée T_c) pour le suivi de l'état hydrique (iii) les difficultés d'interprétation liées au taux de couverture de la culture.
- Les avantages des techniques d'acquisition aéroportées comparées aux données satellitaires.

II. Acquisition des données expérimentales

Trois campagnes expérimentales ont été organisées au cours de cette thèse, couplant des acquisitions aéroportées à des relevés *in situ* (radiométriques, agronomiques, météorologiques). La campagne 2006 a servi de phase exploratoire pour la mise au point du protocole de mesures terrain et aéroporté. La campagne 2007 constitue le jeu de données principal utilisé dans les travaux de recherche valorisés. Enfin, la campagne 2008 a servi à la récolte de quelques données de terrain supplémentaires pour la validation des ces travaux. Les protocoles expérimentaux de ces différentes campagnes sont détaillés à la fin de cette section. Nous présenterons dans un premier temps les différents sites expérimentaux, l'instrumentation (*in situ* et en vol), ainsi que le système d'acquisition aéroporté.

II.1 Les sites expérimentaux

Trois parcelles de canne à sucre ont fait l'objet d'un suivi, dont 2 essais mis en place par le CIRAD (La Mare et Tirano) et une parcelle de planteur (Silotia) utilisée uniquement en 2006 (1^{ère} année de thèse) pour un test ayant servi à la mise en place d'une partie du protocole de mesures.

II.1.1 Parcelle expérimentale de La Mare (suivis 2006 et 2007)

La parcelle de La Mare a été choisie pour l'étude des stress croisés eau*azote. Elle est située au Nord de l'île (Lat 20.9 °S; Lon 55.5 °E; altitude moyenne 60 m) où les champs de canne sont majoritairement cultivés en mode pluvial. C'est un essai « split split plot » de 3 variétés (R570 – R579 – R575), cultivées sous 2 régimes d'irrigation (irrigué – pluvial) et 3 doses d'azote (0/N – 65/N – 130/N). Chaque combinaison de traitement (variété – eau – azote) est répétée 3 fois. Les placettes, d'une surface de 135 m², sont composées de 5 rangs sur une longueur de 18 m avec 1.5 m d'inter-rang. La parcelle est installée sur un ferralsol accrique d'une profondeur moyenne d'un mètre. La pluviométrie annuelle moyenne de la zone est de 1514 mm. L'irrigation des blocs irrigués est assurée par un système de goutte à goutte. L'application d'azote a lieu chaque année en deux fois, au 1^{er} puis 3^{ème} mois suivant la coupe. Au début de la thèse, en 2006, l'essai présentait sa 3^{ème} repousse.

La variété R575 n'a pas été étudiée au cours des campagnes expérimentales, c'est pourquoi elle est présentée en grisé sur la Figure 11 qui illustre la configuration du dispositif expérimental.

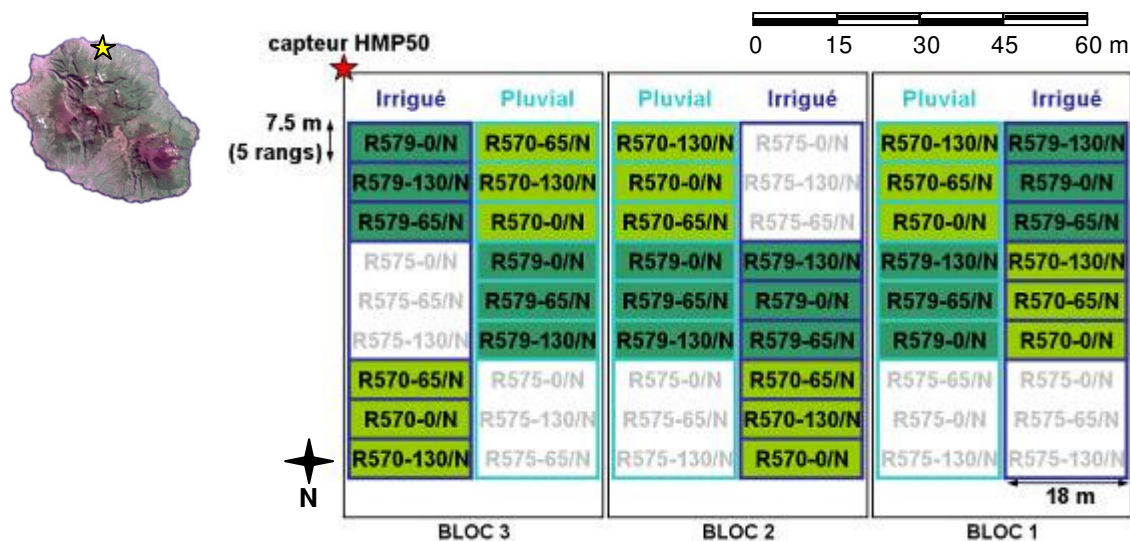


Figure 11 : Configuration des 36 placettes étudiées (variétés R579 et R570) sur la parcelle expérimentale de La Mare.

II.1.2 Parcelle planteur de Silotia (suivi 2006)

La parcelle Silotia a été choisie pour étudier la capacité des capteurs infrarouge thermique fixes à caractériser le stress hydrique, cette parcelle a été utilisée dans le cadre d'un test effectué en octobre 2006. Elle est située chez un planteur de Piton Saint Leu (Lat 21°20 S, Lon 55°30 E, altitude moyenne 270 m), dans une zone sèche où la canne est en majeure partie irriguée. La variété cultivée est la R579, sur une surface de 0.25 ha. Installée sur un sol brun non ferruginisé d'une profondeur moyenne de 70 cm, elle est irriguée par un système de goutte à goutte. La parcelle est suivie dans le cadre d'un programme d'aide à l'irrigation par le CIRAD.

II.1.3 Parcelle expérimentale de Tirano (suivis 2007 et 2008)

La parcelle expérimentale de Tirano, sur laquelle a précédemment été validé l'outil de conseil à l'irrigation OSIRI (Chopart *et al.* 2007), a été étudiée pour la caractérisation du stress hydrique via des mesures in-situ de la température de surface du couvert. Elle est située au Sud de l'île (Lat 21°32 S, Lon 55°50 E, altitude moyenne 250 m). Sur cette zone, les exploitations de canne sont irriguées en complément des pluies, la pluviométrie annuelle moyenne atteignant seulement 1007 mm. La parcelle est installée sur un sol brun andique, peu caillouteux et profond. Plantée en 2002, elle présentait sa 4^{ème} repousse au début de son premier suivi, en 2007. La variété cultivée est la R570, caractérisée par sa robustesse (cf. Annexe 1).

L'essai mis en place par le CIRAD compte 4 traitements et 3 répétitions disposés en blocs (soit 12 placettes). Pour chaque traitement, la taille moyenne d'une placette est de 225 m² (15 m * 15 m qui correspondent à 10 rangs avec 1.5 m d'inter-rang).

En 2007, les traitements étaient les suivants :

- R : Rationné (avec irrigations d'appoint quand l'ETR/ETM diminue de manière trop importante et atteint 0.3). Ce traitement est donc fortement dépendant de la pluviosité, c'est pourquoi il sera qualifié de traitement Pluvial dans la suite du document (traitement « RAIN » dans l'article 4).
- I1 : Conseil OSIRI avec mise à jour du bilan hydrique à chaque tour d'eau (correspondant ici à 5 jours) (« IRR-1 » dans l'article 4)
- I2 : Conseil OSIRI avec mise à jour du bilan hydrique tous les mois (de manière à se placer dans une configuration « planteur » pour qui le bilan hydrique est remis à jour de manière beaucoup moins fréquente) (« IRR-2 » dans l'article 4)
- I3 : Conseil ETM de la Chambre d'agriculture

En 2008, la parcelle a été reconfigurée de manière à mettre en place de nouveaux traitements :

- I : Témoin maintenu à l'ETM par l'outil OSIRI
- R1 : Rationné, avec maintien de l'ETR/ETM à 0.7 par l'outil OSIRI
- R2 : Rationné, avec maintien de l'ETR/ETM à 0.5 par l'outil OSIRI
- R3 : Rationné, avec maintien de l'ETR/ETM à 0.3 par l'outil OSIRI

Les configurations 2007 et 2008 de l'essai de Tirano sont présentées en Figure 12. Les parcelles identifiées en jaune représentent les parcelles suivies dans le cadre de notre étude.

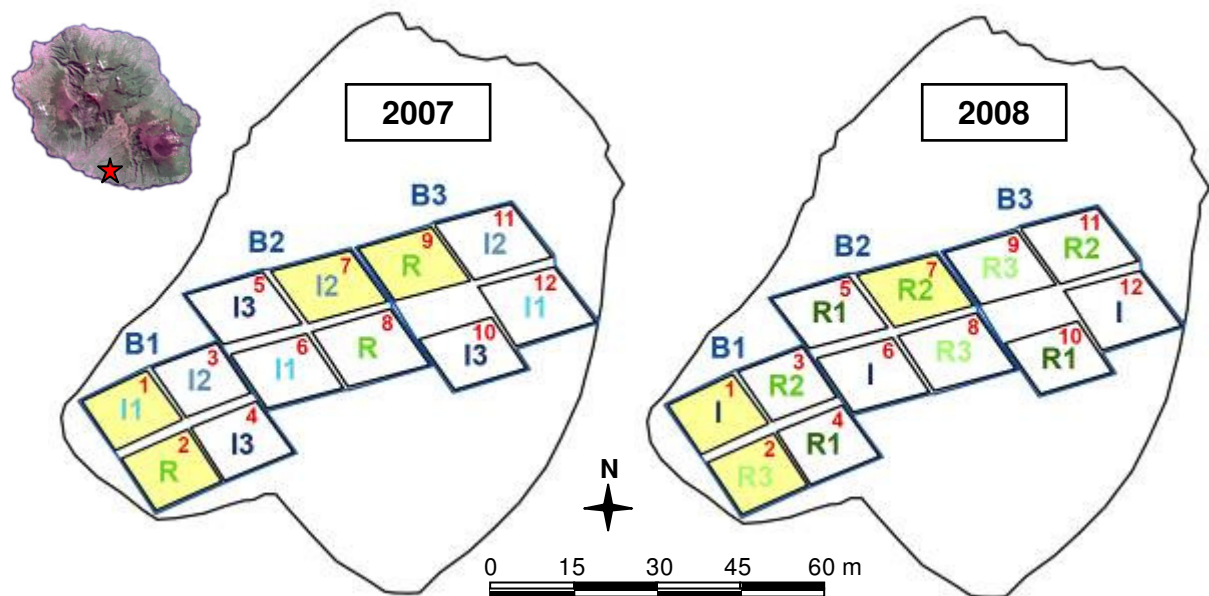


Figure 12 : Configuration des trois blocs (B1, B2, B3) de la parcelle expérimentale de Tirano en 2007 (R : pluvial, I1 : Osiri m.à.j / semaine, I2 : Osiri m.à.j / mois, I3 : Traitement ETM Chambre d'Agriculture) et en 2008 (I : témoin maintenu à l'ETM, R1 : rationné 0.7, R2 : rationné 0.5, R3 : rationné 0.3)

II.2 L'instrumentation

II.2.1 L'instrumentation aéroportée

Au cours de ces travaux de thèse, nous avons bénéficié de deux jeux de capteurs aéroportés optiques et thermiques. Le premier, acquis en 2006, a été utilisé pour une phase exploratoire ayant permis la mise en place d'un protocole de mesure pour la suite des travaux. Le second a servi au cours de la campagne expérimentale réalisée à partir de 2007, dont le jeu de données a été valorisé dans 3 des articles constituant cette thèse (Articles 1, 2, et 3).

II.2.1.1 Les appareils photographiques numériques

Le système d'acquisition aéroporté optique était constitué pour chaque campagne de 3 appareils photographiques numériques montés sur un support, visant le sol à travers une trappe, et activés de manière simultanée à l'aide d'un déclencheur externe. Il a été mis en place en collaboration avec l'Avion Jaune S.A.R.L.

Les deux jeux de capteurs optiques utilisés au cours de cette thèse ont été les suivants : 3 appareils photographiques CANON® EOS 350D (pour la campagne d'acquisition 2006) puis 3 CANON® EOS 400D (campagne d'acquisition 2007) (Figure 13), tous équipés d'un objectif 18-55 mm.

Ces capteurs sont des appareils photographiques numériques du commerce à matrice CMOS de taille 3456*2304 (soit 8.6 mégapixels) pour le 350D et 3888*2592 (soit 10.1 mégapixels) pour le 400D. Le capteur CMOS (*Complementary Metal Oxyde Semi-conductor*) est basé sur un système de cellules photosensibles, couplées à une matrice de filtres rouges, verts et bleus (matrice de Bayer ou matrice CFA : Color Filter Array). Pour créer l'image en couleur, les couleurs « manquantes » sont interpolées par un procédé (connu sous le nom de « démosaïquage ») utilisant généralement un algorithme de propriété industrielle. La conversion entre la charge et le signal se fait pixel à pixel, chaque cellule intégrant tous les composants nécessaires à la transformation du signal. Ces capteurs CMOS sont sensibles aux longueurs d'onde allant de l'ultraviolet (UV) au proche infrarouge (PIR) (Figure 14.a), c'est pourquoi, les appareils sont vendus équipés d'un filtre passe-bande visible interne situé juste devant le capteur afin d'empêcher les ondes UV et PIR d'atteindre le capteur.

Afin de mettre en place notre système d'acquisition captant les longueurs d'onde bleu, vert, rouge, rededge et proche infrarouge, nous avons procédé à quelques adaptations. Pour chaque jeu de 3 capteurs (350D et 400D), un appareil non modifié a été utilisé pour les prises de vues dans le domaine du Visible (rouge, vert, bleu : **RVB**), de 400 à 700 nm. Les 2 autres appareils ont quant à eux été modifiés afin de capter le signal dans les longueurs d'onde au-delà du visible (dans notre cas, le rededge et le proche infrarouge). Cette modification a consisté en (i) le retrait du filtre passe-bande visible interne (ou filtre de rejet du proche infrarouge), situé juste devant le capteur, (ii) le remplacement de ce filtre par une fenêtre transparente ayant les mêmes propriétés optiques que le filtre (de manière à compenser la réduction du chemin optique suite au retrait du filtre), (iii) l'ajout d'un filtre externe fixé à l'objectif. L'appareil dédié aux mesures proche infrarouge (**PIR**) a ainsi été équipé

d'un filtre passe-bande externe LDP LLC[®] XNite BPG filter (808-855 nm, bornes à 50 %), et l'appareil rededge (**RDG**) d'un filtre passe-bande Lot Oriel[®] (690-709 nm, bornes à 50 %) (Figure 13).



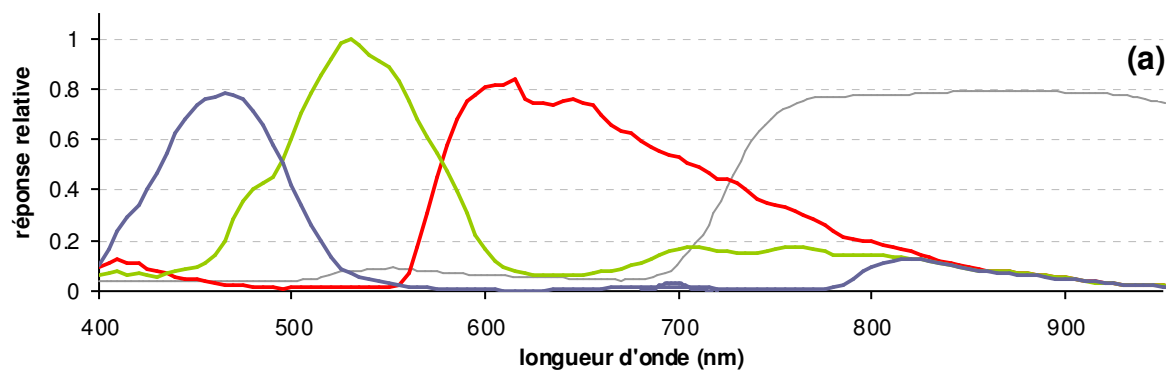
Figure 13 : Les 3 appareils photographiques CANON® EOS 400D constituant le système d'acquisition optique de la campagne 2007 : un capteur RVB (gauche) et deux capteurs modifiés et équipés de filtres (PIR au milieu, rededge à droite).

Les courbes de réponse spectrale relatives ont été déterminées pour chaque appareil dans les laboratoires de l'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales) grâce à l'utilisation d'une source lumineuse monochromatique (Déliot *et al.* 2005). La démarche ainsi que les courbes de réponse du premier jeu de capteurs (350D) sont présentés dans Labbé *et al.* (2007). Les courbes de réponse du second jeu de capteurs (400D) sont visibles dans l'article 1 (Lebourgeois *et al.* 2008a). Elles sont également présentées en Figures 14.b et 14.c.

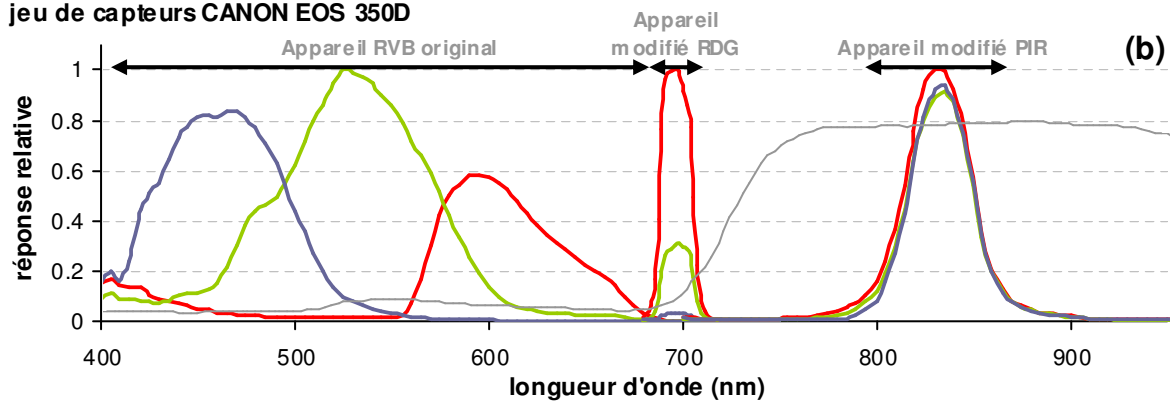
Les images acquises par ces appareils photographiques numériques peuvent être récupérées au format JPEG (images compressées, subissant une correction gamma¹) ou RAW (format brut, nommé CR2 dans le cas des appareils CANON).

¹ Correction visant à améliorer la perception de l'image par l'œil humain qui ne répond pas de manière linéaire à la lumière.

CANON EOS 350D après retrait du filtre passe-bande visible



jeu de capteurs CANON EOS 350D



jeu de capteurs CANON EOS 400D

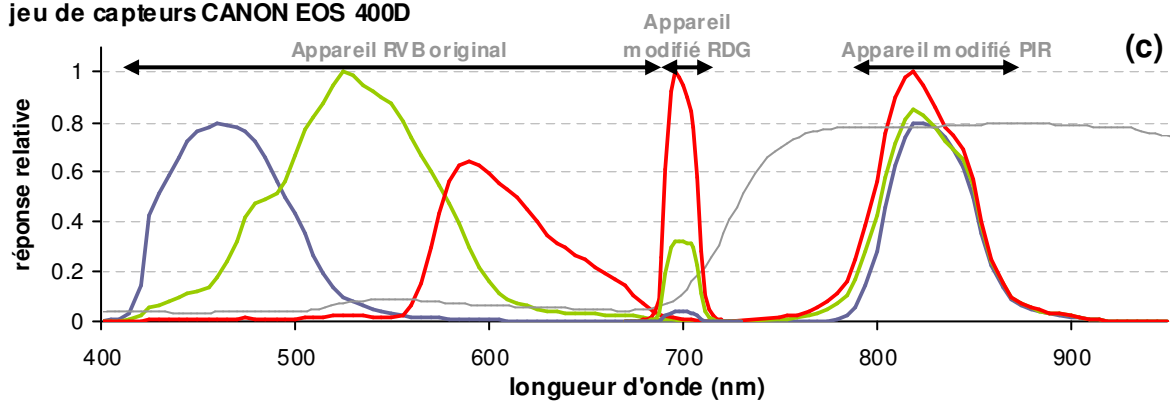


Figure 14 : Réponse spectrale normalisée dans le bleu, le vert, le rouge, le rededge et le proche infrarouge (a) d'un appareil CANON® EOS 350D après retrait du filtre passe bande visible (b et c) des 2 jeux de capteurs optiques (350D et 400D). Les couleurs correspondent à chaque canal de la matrice du capteur (bleu, vert, rouge). La courbe standard de réflectance d'un couvert végétal est représentée en gris.

II.2.1.2 Capteurs thermiques

De même que pour les capteurs optiques, deux caméras ont servi à l'acquisition des images dans l'infrarouge thermique (IRT) : une caméra TH7800 (NEC®) pour la campagne 2006, et une caméra B20 HSV (Flir Systems®) pour la campagne 2007.

Ces 2 caméras sont dotées d'un détecteur FPA (Focal Plane Array : matrice à plan focal) composé de micro-bolomètres non-refroidis (technologie oxyde de vanadium pour la TH7800, silicium amorphe pour la B20 HSV). Elles fournissent des images de taille 320*240 pixels.

Le rayonnement infrarouge thermique est détecté dans la gamme de longueurs d'onde dans laquelle l'atmosphère est la plus transparente (souvent appelée « fenêtre atmosphérique ») : [8 – 14] μm pour la caméra TH7800, et [8 – 14.5] μm pour la caméra B20 HSV (bornes à 50 %) (Figure 15). Ce rayonnement est ensuite transformé en température, en supposant une émissivité de la cible égale à 1 (les végétaux, objets de notre étude ayant une émissivité très proche de 1). La résolution radiométrique et la précision absolue de ces caméras sont respectivement de 0.1 °C et 2 °C.

Elles disposent également d'un système de correction de la température interne de la caméra (à déclenchement manuel pour la TH7800 et automatique pour la B20 HSV), ce qui était indispensable dans notre cas étant données les conditions dans lesquelles ces capteurs ont été utilisés (à l'extérieur d'un ULM).

Caméra thermique B20 HSV

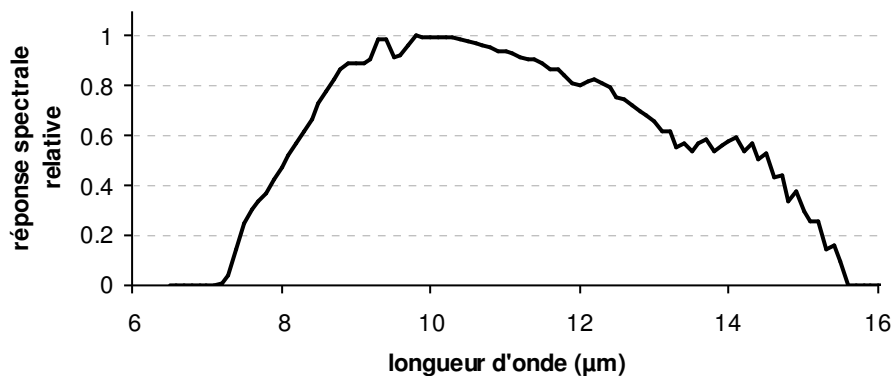


Figure 15 : Réponse spectrale relative de la caméra thermique B20 HSV (Flir Systems®). La réponse de la caméra thermique TH7800 (NEC®) n'est pas fournie par le constructeur.

II.2.1.3 Système d'acquisition aéroporté

Les photos présentées en Figure 16 illustrent le système d'acquisition tel qu'installé à bord de l'ULM en 2007.

On peut y voir les 3 appareils photographiques (400D) montés sur un support et visant le sol à la verticale à travers une trappe. Ayant l'avantage d'avoir un écran déporté, la caméra B20 HSV a pu être fixée à l'extérieur de l'appareil et déclenchée manuellement depuis le siège passager. Le système d'acquisition comportait également (i) un capteur de température et d'humidité de l'air (HMP50, Campbell Scientific®) relié à une centrale d'acquisition (21x, Campbell Scientific®) pour l'enregistrement de profils atmosphériques au moment des vols, permettant la correction des effets

atmosphériques sur les images thermiques (ii) un GPS, connecté par Bluetooth à un PDA pour visualiser et enregistrer la trace de l'ULM, ainsi que son altitude de vol.

Pour la campagne précédente (2006), les capteurs optiques (350D) étaient également installés au sein de la trappe, alors que la caméra TH7800 était tenue à bout de bras lors des acquisitions (la porte côté passager étant pour l'occasion démontée de l'ULM).



Figure 16 : Illustration du système d'acquisition aéroporté en 2007.

II.2.2 Instrumentation in situ

II.2.2.1 Radiothermomètres

De manière à pouvoir comparer les données de température de surface acquises par voie aéroportée à la réalité observée sur le terrain, nous avons procédé à une récolte *in situ* de données radiométriques dans le domaine infrarouge thermique (température de surface, T_s). Pour ce faire, nous avons utilisé différents appareils :

- Un thermomètre infrarouge Raytek® (manuel) : gamme spectrale non communiquée, f.o.v 2.4 ° résolution radiométrique 0.1 °C, précision absolue 1 °C.
- Un pyranomètre à rayons infrarouges KT19.82 (Heitronics®) (manuel) : gamme spectrale [8 – 14] μm , f.o.v. variable en fonction de la distance de mesure, résolution radiométrique 0.1 °C, précision absolue 0.5 °C.
- 4 radiothermomètres IRR-P (Apogée®) (fixes) : gamme spectrale [8 – 14] μm , f.o.v. 45°, résolution radiométrique 0.1 °C, précision absolue 0.2 °C.

II.2.2.2 Autres appareils de mesure

Certains relevés dits « agronomiques », permettant d'obtenir des indicateurs biophysiques sur l'état de la plante, nécessitent l'utilisation d'appareils de mesure particuliers.

Nous avons ainsi utilisé un chlorophylle-mètre (SPAD 502, Minolta®) qui fournit un indicateur relatif de la teneur en chlorophylle des feuilles à partir de mesures de transmittance dans deux bandes spectrales : le rouge (bande d'absorption de la chlorophylle) et le proche infrarouge (dont la réponse est liée à la structure interne de la feuille).

Les mesures de richesse en sucre de la plante ont quant à elles été réalisées à l'aide d'un réfractomètre DR-103L (Bellingham+Stanley®) qui mesure en degré BRIX, la teneur en sucre du jus extrait de la canne.

Les mesures issues de ces deux derniers appareils seront qualifiées respectivement **SPAD** et **BRIX** dans la suite du document.

II.3 Les campagnes expérimentales

On rappelle que les campagnes expérimentales ont eu pour objectif la récolte de données (i) biophysiques et biochimiques descriptives de l'état du couvert végétal (humidité de la plante, LAI, SPAD, ..etc), (ii) radiométriques, acquises par voie aéroportée ou via l'installation de capteurs sur le terrain (notamment pour l'acquisition de données infrarouge thermique).

II.3.1 Campagne expérimentale 2006 : mise au point du protocole de mesures

La campagne expérimentale 2006 avait pour objectif (i) de tester le système d'acquisition aéroporté et (ii) de définir le protocole de mesures *in situ* (mesures radiométriques, météorologiques et agronomiques). Deux parcelles ont fait l'objet d'un suivi durant cette première campagne « exploratoire » : la parcelle expérimentale de La Mare (d'avril à juillet) et celle de Silotia (au mois d'octobre).

II.3.1.1 Suivi de l'essai de La Mare

La Figure 21 présente un schéma récapitulatif des vols et mesures réalisés sur la parcelle de La Mare cours de la campagne 2006, ainsi que les capteurs utilisés. Y sont également détaillés les protocoles de mesures agronomiques.

En 2006, afin d'obtenir des indicateurs terrain de l'état hydrique et nutritionnel de la plante au moment des acquisitions aéroportées, nous avons pris le parti d'effectuer des mesures de couleur des feuilles (SPAD) et humidité des gaines (HUM) le lendemain même des vols. Ces relevés ont été réalisés sur 4 placettes uniquement (R579 0/N Irrigué - R579 130/N Irrigué - R579 0/N Pluvial - R579 130/N Pluvial),

la main d'œuvre alors disponible n'étant pas assez importante pour que les mesures et prélèvements aient lieu sur les 36 placettes que compte l'essai.

La parcelle a été survolée 3 fois par le système d'acquisition précédemment décrit, autour du midi solaire, et à trois paliers d'altitude (300, 600, 900 m) par vol. Avaient lieu simultanément au sol :

- des relevés météorologiques : température de l'air (T_a) et humidité relative (H_r) (capteur HMP50, Campbell Scientific®) en bord de parcelle (voir Figure 11)
- des relevés radiométriques : températures de surface de la canopée (thermomètre infrarouge Raytek®) sur les 4 placettes précédemment citées avec un angle de visée 30°.

Cette première campagne expérimentale a permis le réglage des capteurs aéroportés (vitesse d'obturation, distance focale...etc), le choix des altitudes de vol, ainsi que le rodage et la prise en main de l'équipement embarqué. Ces réglages sont restés inchangés tout au long des campagnes de mesure (cf Article 1, Tableau 1). Le capteur de température et d'humidité de l'air embarqué (HMP50, Campbell Scientific®) ayant un temps de réponse d'environ 2 minutes, nous nous sommes également rendu compte de la nécessité d'effectuer des paliers d'altitude d'une durée adaptée pour obtenir une mesure fiable des conditions atmosphériques au cours du vol.

II.3.1.2 Suivi de la parcelle de Silotia

La parcelle de Silotia a été suivie à partir du mois d'octobre, dans l'objectif (i) de tester la capacité des capteurs infrarouge thermiques IRR-P Apogée® à caractériser le stress hydrique de la plante, (ii) d'étudier l'impact des conditions météorologiques sur la température de la canopée.

Pour cela l'irrigation avait été stoppée un mois et demi avant le début du suivi sur une moitié de la parcelle de manière à obtenir deux traitements : un traitement irrigué et un traitement stressé.

Sur un mât de 5 m de hauteur, situé à la limite des deux traitements, ont été installés différents capteurs (Figure 17) :

- météorologiques : rayonnement global (R_g) (SP-Lite pyranometer, Kipp & Zonen®), vitesse du vent (U) (Anémomètre A100K Vector®), température de l'air (T_a) et humidité relative (H_r) (capteur HMP50, Campbell Scientific®)
- radiométriques : température de surface au dessus de la végétation (T_s) (IRR-P Apogée®)

Les capteurs météorologiques étaient installés à une hauteur de 3.5 m, correspondant à la hauteur approximative de la canopée. Installés à 5 m de hauteur, les capteurs de température de surface (2 capteurs IRR-P Apogée®, précédemment décrits) visaient la canopée avec un angle de 30°, de manière d'une part, à élargir l'empreinte du champ visuel du capteur sur la canopée, et d'autre part, à éviter la proportion de sol éventuellement visible afin de ne mesurer que la température de la canopée (T_c).

Une semaine après l'installation, le suivi a dû être arrêté, la parcelle ayant été incendiée. Les résultats de ce test, non présentés dans ce document, nous ont permis de comprendre que les deux capteurs infrarouges thermiques devaient pointer la canopée avec un même angle de visée par rapport au

soleil pour que les mesures soient comparables, ce afin d'éviter les effets azimutaux (Fuchs 1990). L'expérience sera reconduite l'année suivante sur la parcelle de Tirano avec une nouvelle configuration des capteurs.

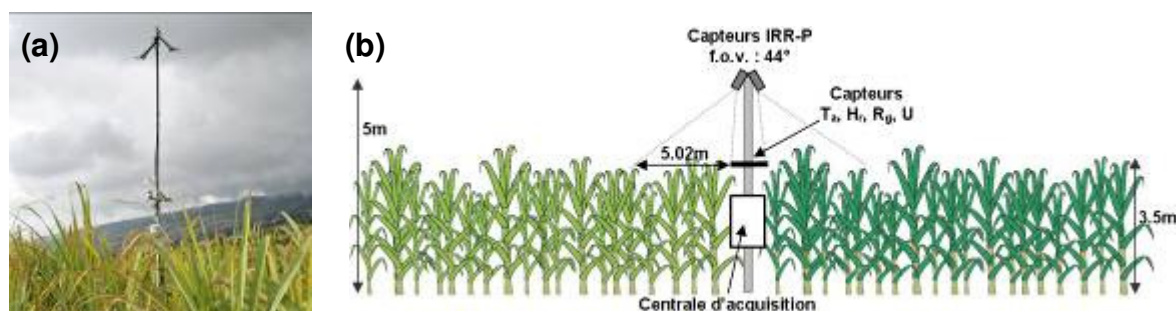


Figure 17 : Configuration des capteurs sur la parcelle de Silotia : (a) le mât et les capteurs, (b) schéma du dispositif (à gauche : traitement stressé, à droite : traitement irrigué).

II.3.2 Campagne expérimentale 2007 : Acquisition des données

Deux parcelles ont été suivies au cours de 2007 : la parcelle expérimentale de La Mare (de fin avril à septembre) et celle de Tirano (de juin à octobre).

II.3.2.1 Suivi de l'essai de La Mare

Le détail de la campagne de mesures aéroportées et terrain sur la parcelle de La Mare est visible en Figure 22. Un suivi mensuel des paramètres agronomiques a pu être organisé de mai à septembre. Des mesures supplémentaires de hauteur des tiges (HTVD) et de nombre de limbes verts (NBLV) ont été effectuées afin d'estimer une valeur relative de LAI vert par placette. Pour cela nous avons dans un premier temps calculé la surface de limbes verts totaux déroulés (SLVT) par tige à partir de la relation suivante, pour chaque variété :

$$SLVT = a * [1 - \exp(-b * HTVD * NBLV)] \quad (1)$$

où SLVT est en cm² et HTVD en m. Cette relation exponentielle est présentée en Figure 18 pour les variétés R570 et R579. Les coefficients a et b pour chaque variété, ainsi que les paramètres de régression sont données dans le tableau 1. Ces relations ont été établies par Martiné en 2004 sur l'essai de La Mare pour les variétés R570 et R579¹. Réalisées sur 12 cannes par placette, ces mesures de SLVT ont ensuite été moyennées pour chaque placette. La SLVT moyenne a ensuite été multipliée par le nombre de tiges par rang et divisée par la surface de la placette afin de calculer le LAI. Afin de tester la représentativité de ces mesures (issues de 12 cannes par placette seulement),

¹ A 3 dates, des lots de 4 à 10 cannes de mêmes hauteurs avaient été regroupés. Sur chaque canne, HTVD et NBLV ont été mesurés et comptés. Les SLVT ont été dérivés en mesurant la longueur (Len) et la largeur (Wid) de chaque feuille, puis en calculant et sommant la surface de chaque feuilles ($0.7 * Len * Wid$) par tige.

nous avons effectué un test (Figure 22) au cours duquel, sur 8 placettes, ont été mesurés, sur 3 m linéaire, (rang central) le HTVD et NBLV sur toutes les tiges. Les résultats montrent une surestimation du LAI lié à la hauteur des 12 tiges choisies pour les suivis mensuels. Un facteur correctif (par variété) a donc été appliqué aux valeurs de LAI estimées afin de les rendre plus proches de la réalité observée sur le terrain.

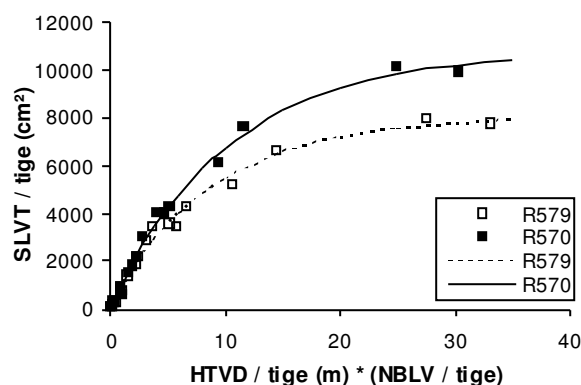


Figure 18 : Régression exponentielle entre la surface de limbes verts totaux déroulés (SLVT), la hauteur des tiges (HTVD) et le nombre de limbes verts (NBLV)

Variété	a	b	Erreur Standard (cm²)	R²
R570	10747.5	0.098	258.6	0.997
R579	8024.1	0.114	266.5	0.995

Tableau 1: Coefficients et erreur standard de la régression exponentielle $SLVT = a * [1 - \exp(-b * HTVD * NBLV)]$, pour chaque variété (Martiné 2004).

Les mesures non destructives (SPAD, HTVD, NBLV) ont été effectuées sur les 3 rangs centraux de chaque placette, sur une longueur de 10 mètres délimitée par des piquets, afin d'éviter les effets de bordure. Les mesures destructives, de richesse en sucre (BRIX) et d'humidité des gaines (HUM), ont été réalisées sur les 3 rangs centraux également, mais en bordure de la zone dédiée aux mesures non destructives, afin de ne pas endommager l'état de la parcelle observée par télédétection.

La parcelle a été survolée sept fois entre mai et septembre. Une illustration des images acquises dans le visible, le rededge, le proche infrarouge et l'infrarouge thermique est visible en annexe 6. Les acquisitions avaient lieu autour du midi solaire, à 4 paliers d'altitude (400, 600, 900, 1 200 m) par vol, afin de disposer d'un plus large panel de conditions atmosphériques. Simultanément à ces vols, quatre mires en plastique, d'1 m² chacune, et colorées dans différentes teintes de gris étaient disposés au sol, le long de l'essai afin de servir de cibles (spectrales) invariantes artificielles.

Ont également été effectués au sol :

- Des relevés météorologiques : température de l'air (T_a) et humidité relative (H_r) (capteur HMP50, Campbell Scientific®) en bord de parcelle (Figure 11).
- Des relevés radiométriques : température de surface (thermomètre infrarouge Heitronics® KT 19) sur 3 cibles (chaude : drap foncé, froide : canne à sucre, intermédiaire : chemin herbeux) à l'aide d'une perche, afin d'effectuer les mesures à la verticale au dessus des cibles (Figure 19).

Ces relevés pourront de cette manière être directement comparés à ceux effectués par la caméra thermique au cours des vols.

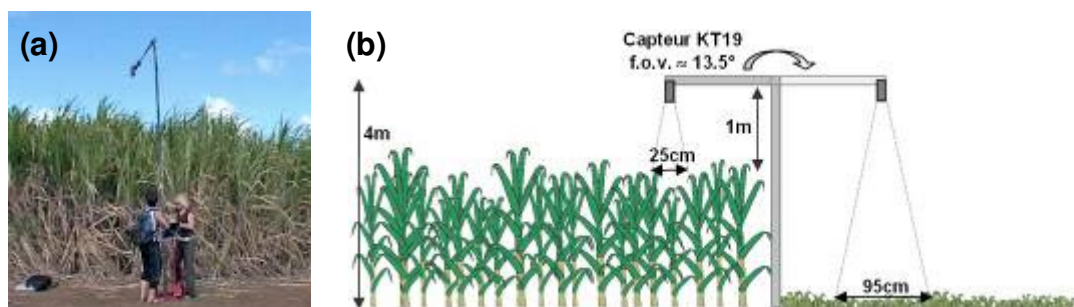


Figure 19 : Illustration des mesures de température de surface réalisées simultanément aux vols à l'aide du radiothermomètre KT19 (Heitronics®) sur la canopée, et le chemin herbeux.

II.3.2.2 Suivi de l'essai de Tirano

La parcelle de Tirano a été suivie à partir de fin juin, et ce jusqu'au mois d'octobre. La campagne expérimentale est détaillée en Figure 23. Le suivi agronomique, réalisé mensuellement sur les 12 placettes que compte l'essai, a concerné les mêmes variables que celles de l'essai de La Mare (SPAD, HTVD, NBLV, BRIX, HUM).

Au dessus des placettes 1, 2, 7 et 9 (respectivement I1, R, I2, R, cf plan de l'essai en Figure 12), à 7 mètres de hauteur, ont été installés des capteurs infrarouges thermiques IRR-P (Apogée®) visant la canopée au nadir (Figures 20.c et 20.d). Cette visée verticale avait pour objectif d'une part, d'éviter les effets azimutaux (Fuchs 1990), d'autre part de faciliter la comparaison des températures de surface à celles effectuées en vol par la caméra thermique.

La parcelle a également été équipée de capteurs météorologiques installés à 3.5 mètres de hauteur : un pyranomètre (SP-Lite pyranometer, Kipp & Zonen®) mesurant le rayonnement global (R_g), un capteur de température (T_a) et d'humidité relative (H_r) de l'air (HMP50, Campbell Scientific®) et un anémomètre (A100K Vector®) (Figures 20.a et 20.d).

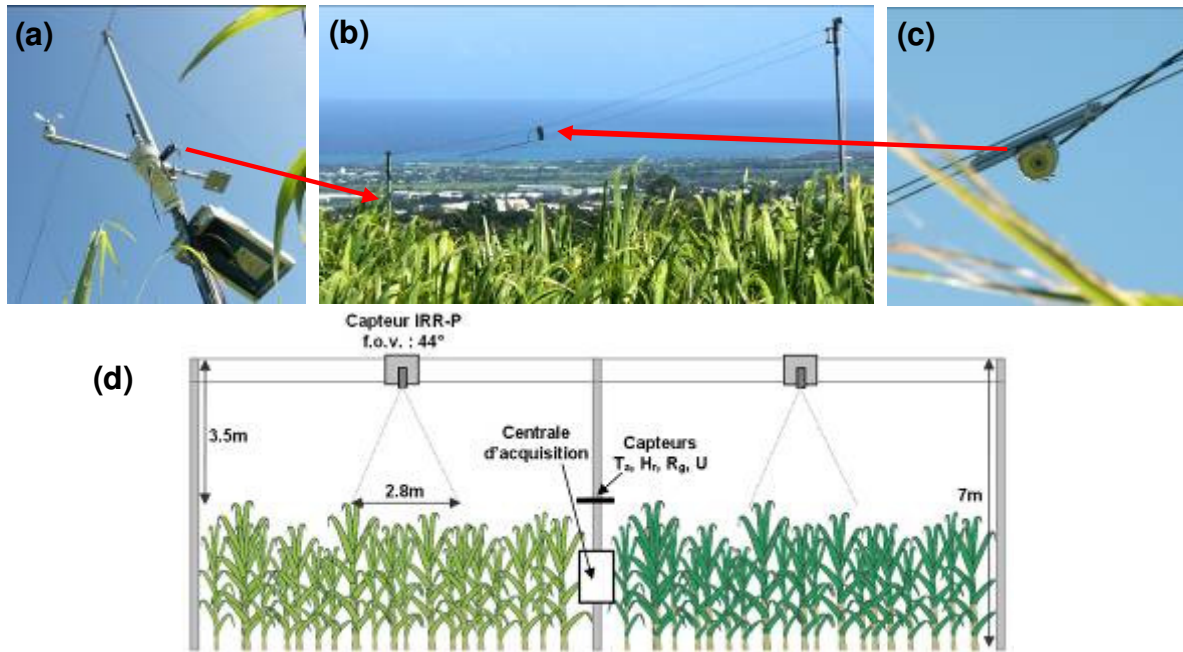


Figure 20 : Mise en place des capteurs sur la parcelle de Tirano : (a) capteurs météorologiques (anémomètre, capteur de température et d'humidité relative de l'air, pyranomètre), (b) vue d'ensemble, (c) capteur infrarouge thermique IRR-P (Apogée®), (d) schéma du dispositif.

Le suivi de l'état hydrique du sol a été assuré sur chaque placette par un réseau de sondes TDR (Time-Domain Reflectometer) installées à 7 profondeurs différentes (20, 40, 60, 80, 100, 170, 190 cm) et dont les mesures étaient récoltées à une fréquence hebdomadaire.

Les placettes du Bloc 1 (Figure 12) étaient également équipées de lysimètres d'une surface de 2.25 m² et d'une profondeur de 180 cm pour les mesures de drainage.

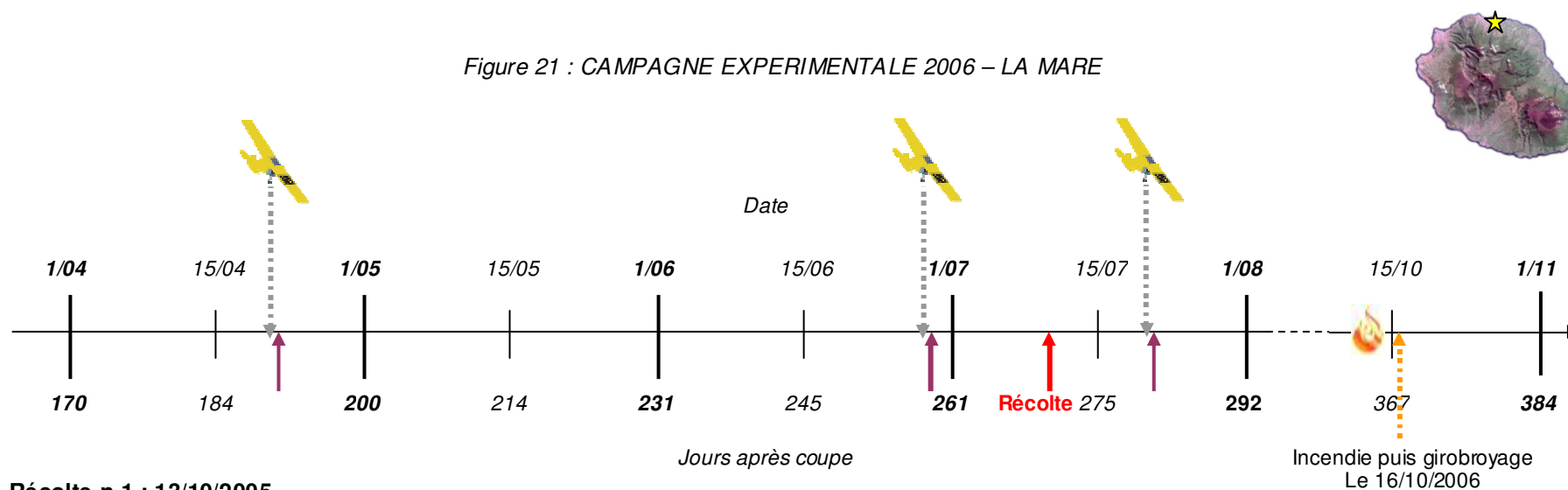
II.3.3 Campagne expérimentale 2008 : Données de validation in-situ

La campagne expérimentale 2008, présentée en Figure 24, n'a concerné que la parcelle de Tirano. Le dispositif de suivi est resté le même qu'en 2007, excepté le remaniement des traitements sous les capteurs installés sur des placettes 1, 2, 7, 9 (respectivement I, R3, R2, R3 pour 2008, cf. Figure 12). Les mesures ont eu lieu au sol uniquement (pas de survol par le système d'acquisition aéroporté).

Synthèse des points-clés du chapitre II

- La mise au point du protocole de mesures a eu lieu en 2006.
- La collecte de des données utilisées dans les articles s'est déroulée en 2007.
- Nous avons suivi 2 essais principaux : l'un présentant un stress croisé eau * azote (La Mare), l'autre caractérisé par des régimes hydriques contrastés (Tirano).
- Le système d'acquisition aéroporté était constitué (i) d'appareils photographiques mesurant le signal dans le visible, le rededge et le proche infrarouge, (ii) d'une caméra thermique pour les mesures de température de surface, (iii) d'un GPS et d'un capteur d'humidité et de température de l'air pour l'enregistrement de profils atmosphériques.
- Les campagnes expérimentales ont permis la récolte de données *in situ* (i) agronomiques (LAI, SPAD, Humidité des gaines, mais également BRIX et rendement), (ii) radiométriques (températures de surface et de canopée), (iii) météorologiques.

Figure 21 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2006 – LA MARE



Récolte n-1 : 13/10/2005



Acquisitions aéroportées (altitudes : 300, 600, 900 m) : **RVB, RDG, PIR** (sauf 26 juin) (CANON® EOS 350D), **IRT** (Caméra TH7800 NEC®), **T_a, H_r, Trace GPS**
+ Acquisitions terrain simultanées : **T_a, H_r, T_s** (Thermomètre infrarouge Raytek®)

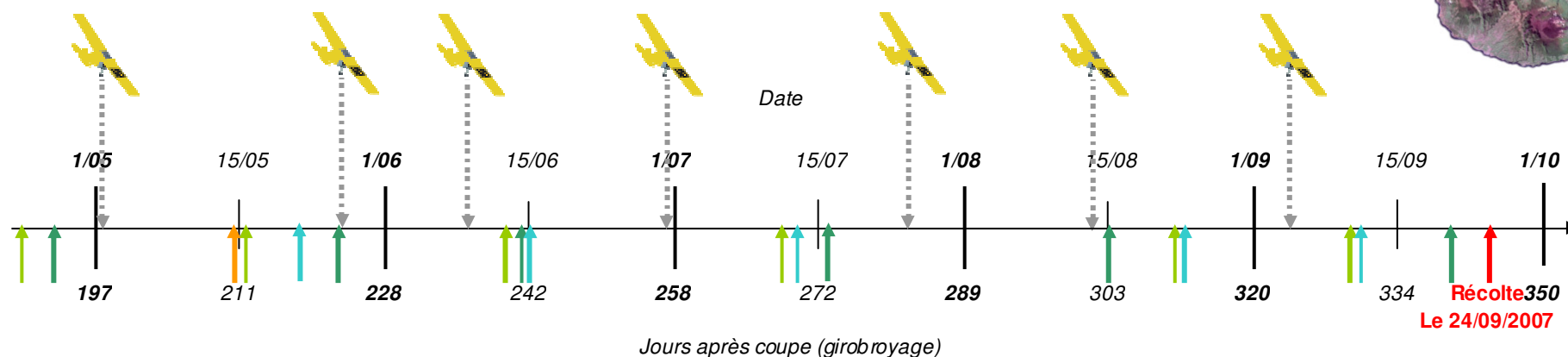
Mesures effectuées sur 4 placettes (R579 0/N Irr - R579 130/N Irr - R579 0/N Plu - R579 130/N Plu) :

- **SPAD** (Couleur des feuilles) – Moyenne de 6 mesures effectuées sur le tiers médian de 30 feuilles (1^{ère} feuille déroulée au-dessus du TVD) par placettes + analyses foliaires (N, P, K, Ca, Mg)
- HUM** (Humidité des gaines) – Prélèvement des 5 gaines sous le TVD, sur 8 cannes par placette. Pesée des gaines avant et après 48h à l'étuve

Mesures effectuées sur les 36 placettes suivies :

- **Rendement** – sur 10 m linéaire, rang central
- BRIX** – Mesure en 5 points par tige, sur 4 cannes par placette

Figure 22 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2007 – LA MARE



Récolte année n-1 : 16/10/2006 (date du girobroyage)



Acquisitions aéroportées (altitudes : 400, 600, 900, 1 200 m) : **RVB, RDG, PIR** (CANON® EOS 400D), **IRT** (Caméra B20 HSV FLIR Systems®), **T_a, H_r, Trace GPS**
+ Acquisitions terrain simultanées : **T_a, H_r, T_s** (Thermomètre infrarouge Heitronics® KT 19)

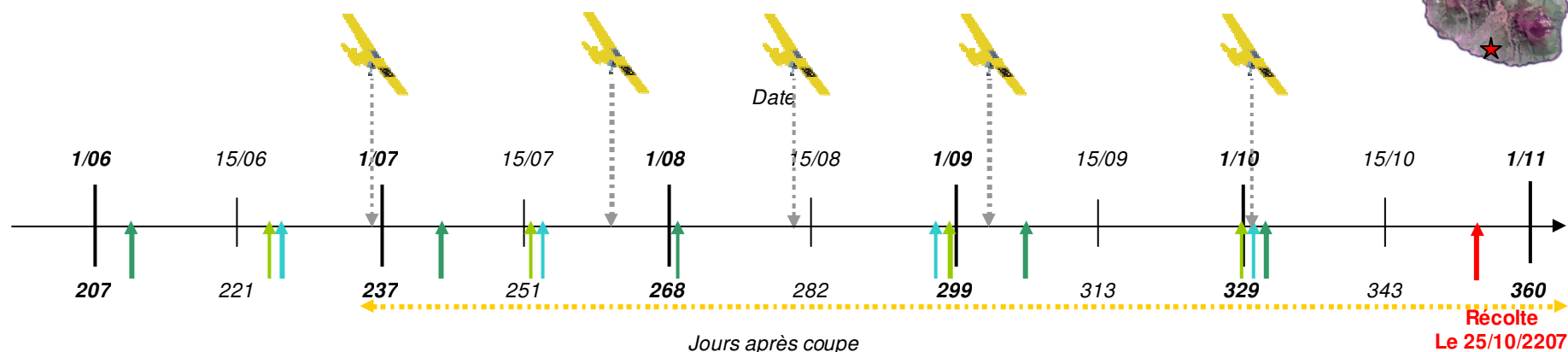
Mesures effectuées sur les 36 placettes suivies :

- **SPAD** (Couleur des feuilles) – Moyenne de 6 mesures effectuées sur le tiers médian de 30 feuilles (1^{ère} feuille déroulée au-dessus du TVD) par placettes
- **HTVD** (Hauteur de la tige jusqu'au TVD) et **NBLV** (Nombre de limbes verts sous le TVD) – Mesures effectuées sur 12 cannes marquées par placette (4 cannes par rang, sur les 3 rangs centraux de chaque placette)
- **HUM** (Humidité des gaines) – Prélèvement des 5 gaines sous le TVD, sur 4 cannes par placette. Pesée des gaines avant et après 48h à l'étuve
BRIX – Mesure en 5 points par tige, sur 4 cannes par placette
- **Rendement** – sur 10 m linéaire, rang central

Mesures effectuées sur 8 placettes du bloc 2 :

- **Test LAI** – sur 3 m linéaire, rang central, mesure du HTVD, NBLV sur toutes les tiges pour tester la représentativité des mesures mensuelles effectuées sur 12 tiges par placette seulement

Figure 23 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2007 – TIRANO



Récolte année n-1 : 06/11/2006



Acquisitions aéroportées (altitudes : 500, 700, 1000, 1 300 m) : **RVB, RDG, PIR** (CANON® EOS 400D), **IRT** (Caméra B20 HSV FLIR Systems®), **T_a, H_r, Trace GPS**

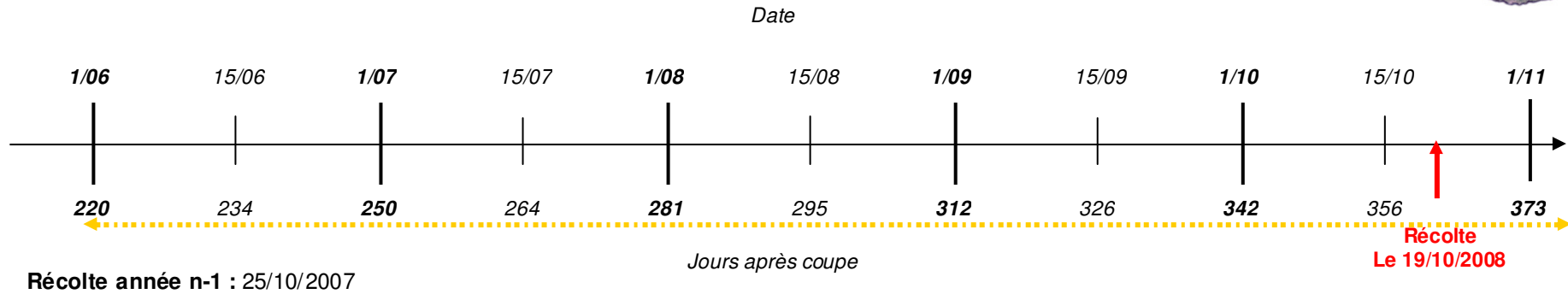
Mesures en continu effectuées sur les 4 placettes équipées de capteurs :

- ◀...▶ **Température de surface** – Mesure de la T_s en continu par 4 capteurs IRR-P Apogee
- Conditions environnementales** – Mesure en continu de R_g , T_a , H_r , U
- Etat hydrique du sol** – Drainage (Lysimètres), pluies, humidité du sol (TDR)

Mesures effectuées sur les 12 placettes :

- **SPAD** (Couleur des feuilles) – Moyenne de 6 mesures effectuées sur le tiers médian de 30 feuilles (1^{ère} feuille déroulée au-dessus du TVD) par placettes
- **HTVD** (Hauteur de la tige jusqu'au TVD) et **NBLV** (Nombre de limbes verts sous le TVD) – Mesures effectuées sur 8 cannes marquées par placette (4 cannes par rang, sur les 2 rangs intermédiaires de chaque placette)
- **HUM** (Humidité des gaines) – Prélèvement des 5 gaines sous le TVD, sur 4 cannes par placette. Pesée des gaines avant et après 48h à l'étuve
BRIX – Mesure en 5 points par tige, sur 4 cannes par placette
- **Rendement** – sur 10 m linéaire, rang central de chaque placette

Figure 24 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2008 – TIRANO



Mesures effectuées sur les 4 placettes équipées de capteurs :

- ◀...▶ **Température de surface** – Mesure de la T_s en continu par 4 capteurs IRR-P Apogee
- Conditions environnementales** – Mesure en continu de R_g , T_a , H_r , U
- Etat hydrique du sol** – Drainage (Lysimètres), pluies, humidité du sol (TDR) (environ toutes les 2 semaines)

III. Principaux résultats

« Du signal à la mesure », « de la mesure à l'indicateur », et enfin de « l'indicateur au conseil », nous présentons dans cette partie les résultats de recherche permettant l'élaboration de produits et outils dédiés pour l'aide à la gestion des apports hydrique et nutritionnel à la parcelle. Ces résultats sont détaillés dans les quatre articles cités en introduction dont nous ne présentons ici que les résumés, en s'attachant à souligner les résultats les plus marquants.

III.1 Du signal à la mesure

Dans cette partie sont détaillées les étapes d'étalonnage des capteurs multispectraux (appareils photographiques et caméra thermique) et de traitement des images acquises par le système aéroporté. Du signal brut à la mesure utilisable pour l'élaboration d'indicateurs d'état des plantes, nous expliquons les phases de traitement nécessaires à l'obtention d'images radiométriquement comparables entre elles.

Les distorsions géométriques des différents capteurs ont également été caractérisées (Pierrot-Desseilligny 2008). Les résultats, présentés en annexe 5 de ce document, révèlent de très faibles déformations sur les bords de l'image qui n'ont pas été corrigées, les parcelles d'études se situant toujours au centre des images acquises.

III.1.1 Les appareils photographiques numériques

Les travaux réalisés sur les capteurs optiques sont présentés en détail dans l'article 1, « ***Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test*** », publié en 2008 dans la revue électronique *Sensors* (FI = 1.57).

L'objectif de cette étude était (i) de tester une série de corrections radiométriques permettant de réduire les distorsions radiométriques liées d'une part à l'appareil photographique lui-même, et d'autre part aux conditions environnementales (Figure 25), (ii) de mesurer les effets de ces corrections sur la capacité de ce type de capteurs à estimer les variables de surface descriptives de l'état des cultures.

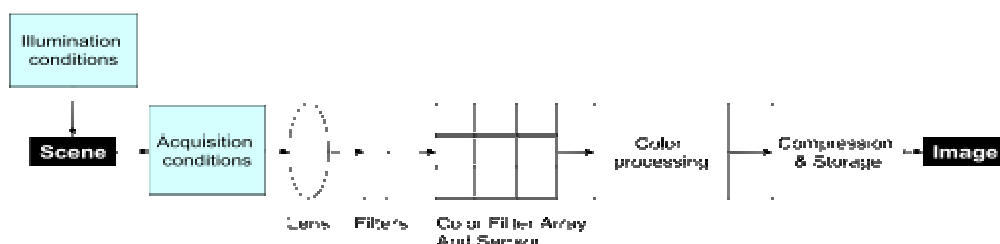


Figure 25 : Facteurs impliqués dans le processus d'acquisition de l'image par un appareil photographique numérique : facteurs liés à l'environnement (boîtes bleues) et à l'appareil photographique (boîtes blanches).

Pour cela, six campagnes d'acquisitions aéroportées (images RVB, RDG et PIR, enregistrées aux formats JPEG et RAW simultanément), couplées à des mesures biologiques sur le terrain (LAI, SPAD), ont eu lieu en 2007 au dessus de la parcelle expérimentale de La Mare (Figure 11).

Le système d'acquisition multispectral aéroporté, décrit en partie 2 du présent document, était composé de trois appareils photographiques numériques (CANON® EOS 400D).

Les corrections radiométriques concernent :

- le décodage des images acquises au format RAW : cette étape sert à la décomposition de la matrice de Bayer (Color Filter Array, Figure 26.a). Elle est effectuée sur les images acquises au format RAW, par l'utilisation du logiciel IRIS 5.5 (Buil C., communication personnelle; <http://www.astrosurf.com/buil/iris/iris.htm>) et a pour objectif l'obtention d'images mono-spectrales, correspondant chacune à une bande spectrale donnée (bleu, vert ou rouge) (Figure 26.b). Nous avons ensuite comparé, pour chaque bande spectrale d'acquisition (R, V, B, RDG et PIR) la réponse observée sur les images RAW décodées et celle observée sur les images JPG (compressées, et subissant une correction gamma). Les résultats montrent qu'en raison des faibles valeurs mesurées dans le visible (dûes à la réflectance peu élevée des couverts végétaux dans cette gamme de longueurs d'onde) et dans le proche infrarouge (dûes à la sous exposition des images acquises), la relation entre les images RAW et JPG peut être considérée comme linéaire (du fait d'une sous-exposition de l'appareil PIR).

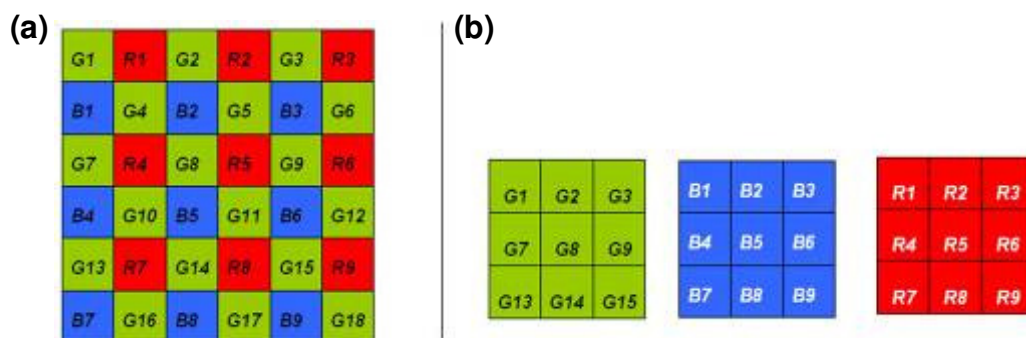


Figure 26 : (a) Matrice CFA (Color Frame Array) d'un appareil photographique numérique CANON, (b) extraction d'images « spectralement pures ».

- la correction du vignettage : le vignettage est un phénomène d'atténuation du signal entraînant un assombrissement sur les bords de l'image. Il est principalement lié aux propriétés optiques des lentilles d'appareil photographique et complique l'utilisation des images dans des applications où le signal doit être quantifié (Goldman and Chen 2005). Pour le corriger, nous avons développé une méthode originale basée sur (i) l'utilisation d'une image moyenne de l'ensemble des acquisitions (500 photos par bande spectrale) (ii) le calcul d'un profil polynomial de vignettage (dont le degré varie en fonction de la bande spectrale) à partir de l'image moyenne, (iii) la création d'un masque de correction (Figure 27). Le vignettage observé apparaît plus marqué sur les images acquises par les appareils photographiques modifiés, engendrant des pertes de signal de 46 % et 35 % pour les images RDG et PIR respectivement, et ce à partir du centre de l'image. Les images acquises par l'appareil RVB montrent des profils de

vignettage caractérisés par peu de distorsion au centre mais une décroissance plus forte en bordure d'image (perte de signal aux alentours de 35 % dans les trois bandes visibles).

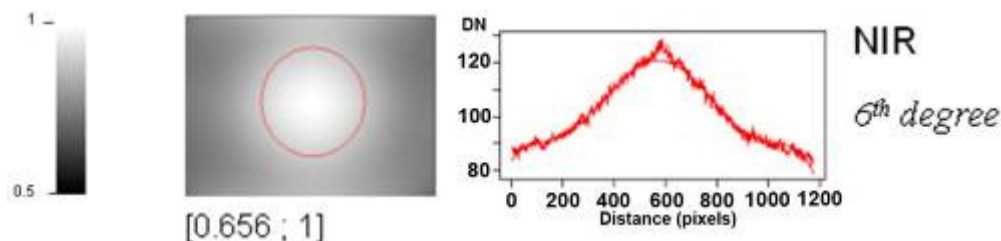


Figure 27 : Exemple de filtre et de profil de vignettage (polynôme de degré 6) tiré de l'image moyenne des clichés acquis par le capteur PIR (DN : Digital Numbers). Le cercle rouge représente une perte de signal de 10 %.

- la normalisation radiométrique de la série temporelle d'images : si les réglages des appareils photographiques sont restés inchangés tout au long de l'expérimentation, les images n'en demeurent pas moins influencées par les conditions d'acquisition (principalement liées à l'éclairement solaire, mais également aux conditions atmosphériques). Afin de rendre ces images comparables entre elles en terme de comptes numériques¹, nous avons testé 2 méthodes de normalisation radiométrique : (i) une méthode basée sur l'utilisation de la réponse spectrale observée sur des cibles invariantes sombres et claires, (ii) une méthode dans laquelle le rayonnement global est estimé par le cosinus de l'angle zénithal solaire ($\cos \theta$). Ces deux méthodes ont été évaluées sur des cibles invariantes artificielles disposées le long de la parcelle à chaque acquisition. Les résultats indiquent que les deux méthodes réduisent de manière significative les variations observées sur les cibles invariantes, avec un léger avantage pour la méthode $\cos \theta$ dans les bandes rouge et PIR. Si l'avantage de la méthode des invariants est de prendre en considération des variations atmosphériques, il n'est pas visible dans nos résultats, l'atmosphère n'étant pas dans notre cas un facteur de premier ordre (les conditions atmosphériques des dates d'acquisition étaient semblables : temps clair).

L'influence de chacune de ces corrections radiométriques sur la capacité du système d'acquisition à estimer les variables biophysiques décrivant l'état de la culture a ensuite été testée. Pour cela, trois indices de végétation normalisés (GNDVI, Vlgreen², NDVI) (Gitelson *et al.* 1996; Gitelson *et al.* 2002; Rouse *et al.* 1973) ont été mis en relation avec un indicateur d'état chlorophyllien de la canopée ($CC = SPAD * LAI$) (Hinzman *et al.* 1986; Serrano *et al.* 2000), pour les 36 placettes de la parcelle expérimentale de La Mare et 6 dates d'observation. Les résultats de corrélation des différentes fonctions exponentielles entre les indices de végétation et l'indice CC sont présentés en Figure 28. Ils mettent en évidence (i) que globalement, le format JPG peut être substitué au format RAW lorsque le signal mesuré est faible (faible réflectance des cibles et/ou sous exposition de l'appareil), (ii) que la normalisation radiométrique réduit la qualité des corrélations (difficulté liée aux sources d'erreur

¹ Le calcul de la réflectance nécessite la connaissance des coefficients de calibration absolue pour chaque capteur, ainsi que des données de rayonnement incident. Ne disposant pas de ces données, nous avons travaillé ici en compte numérique, les images étant par conséquent comparées de manière relative les unes aux autres.

² $Vlgreen = V - R / V + R$, ou V et R sont les réflectances dans les bandes verte et rouge respectivement.

pouvant altérer l'efficacité de la méthode des invariants : erreurs de géoréférencement, de photo-interprétation...), (iii) que seule la correction du vignettage améliore la qualité des indices de manière significative, d'autant plus quand les bandes utilisées ont été acquises avec deux appareils différents (RVB et PIR par exemple, c'est le cas pour le NDVI et le GNDVI).

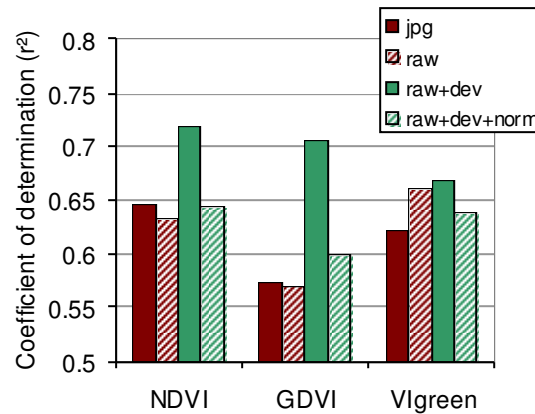


Figure 28 : Coefficients de détermination des relations exponentielles liant le CC ($LAI * SPAD$) aux trois indices de végétation sur les 36 placettes et les 6 dates d'acquisition (jpg : format jpeg, raw : format brut décodé, dev : corrigé du vignettage, norm : normalisé par la méthode des invariants).

En conclusion, cette étude montre que moyennant quelques modifications (adaptation de filtres), une caractérisation spectrale des appareils et du vignettage des images, ainsi que des réglages adaptés, les appareils photographiques du commerce peuvent être utilisés comme capteurs multispectraux et permettre l'estimation quantitative de paramètres de surface dans le cas d'applications opérationnelles de suivi des cultures. Néanmoins, les images acquises dans la bande étroite du rededge n'ont pu être utilisées dans notre cas, les images obtenues étant floutées par l'effet couplé d'une vitesse d'obturation lente et des vibrations de l'ULM en vol.

III.1.2 La camera thermique

Plusieurs facteurs peuvent affecter la précision de la mesure thermique. Celle-ci dépend d'abord de la précision du capteur utilisé (fournie par le constructeur), mais également de la qualité de son étalonnage et de son optique (vignettage). Lorsque les mesures sont effectuées par voie aéroportée, comme dans la présente étude, les effets liés à la colonne atmosphérique se situant entre le capteur et la cible affectent également la mesure et doivent de ce fait être corrigés.

Ces étapes de calibration et de correction sont détaillées dans cette section, dans le cas de la caméra thermique B20HSV (Flir Systems®).

III.1.2.1 Etalonnage

La caméra thermique B20 HSV (Flir Systems®) a fait l'objet d'un étalonnage dans les laboratoires de l'INRA d'Avignon. Pour cela nous avons utilisé un corps noir en cuivre, recouvert d'une peinture à émissivité proche de 1, dont la température est contrôlée par un bain thermostaté. De même que pour les radiothermomètres (KT19.82 Heitronics® et IRR-P Apogée®) dont les résultats d'étalonnage sont présentés respectivement dans l'article 2 et 4, nous avons travaillé dans la gamme de températures allant de 20 °C à 40 °C, par pas d'environ 5 °C. A chaque palier de température, plusieurs images ont été acquises par la caméra, dont l'émissivité était réglée à 1.

Nous avons ensuite calculé la moyenne des pixels de chaque image, et comparé cette valeur à la température du corps noir. Les résultats (Figure 29) montrent un biais faible (-0.37 °C) entre la caméra et le corps noir et une distribution aléatoire des résidus (non présentée).

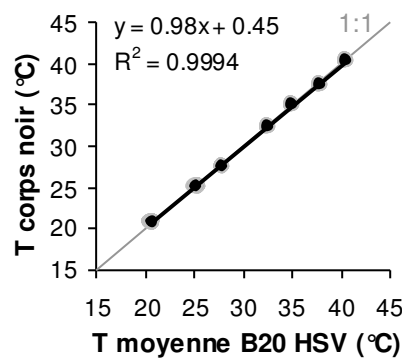


Figure 29 : Résultats d'étalonnage de la caméra thermique B20 HSV.

III.1.2.2 Vignettage

Suivant la même méthodologie que pour les capteurs optiques (cf Article 1), le vignettage de la caméra B20HSV a été caractérisé à partir de l'image moyenne d'un grand nombre de clichés (320) obtenus sur différents sites (expérimentaux et autres) en 2007.

Les profils de vignettage horizontal et diagonal de la caméra sont présentés en Figure 30.a et en Figure 30.b respectivement. La fonction polynomiale (degré 2) de distribution exprime le facteur de vignettage en chaque point de l'image. Les résultats illustrent un vignettage faible, inférieur à 0.3 °C pour le profil horizontal, et de l'ordre de 0.5 °C pour le profil diagonal. Les vignettages, montrant une amplitude du même ordre de grandeur que le bruit observé autour des profils et que la précision des capteurs, n'ont pas été corrigés sur les images.

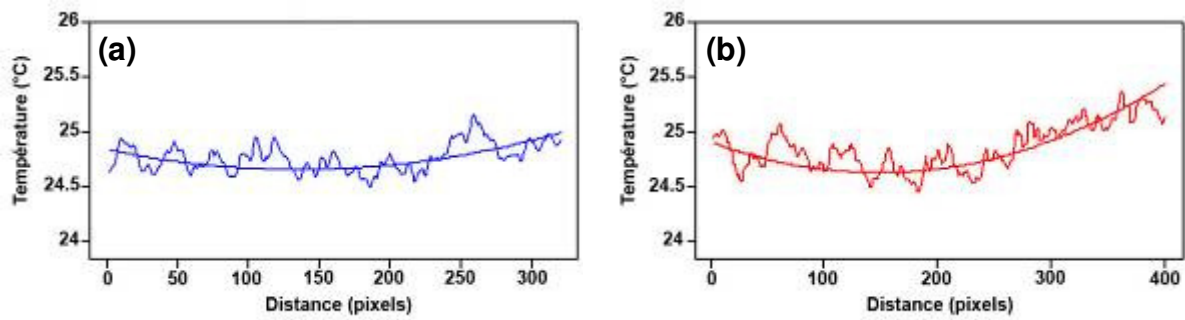


Figure 30 : Profils de vignettage de la caméra thermique B20HSV et courbes de régression polynomiales (degré 2) : (a) profil horizontal, (b) profil diagonal

III.1.2.3 Corrections atmosphériques

La question des corrections atmosphériques sur les images thermiques acquises par voie aéroportée est traitée dans l'article 2 « **Atmospheric corrections of low altitude thermal infrared images acquired over a tropical cropped area** », présenté en 2008 à l'*IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*.

Quand elles sont acquises par télédétection, les images infrarouges thermiques présentent des températures différentes de celles observées au niveau du sol, ce qui complique leur utilisation pour le développement d'indices de stress hydrique. Ces effets sont liés à la présence de l'atmosphère entre la cible et le capteur qui reçoit : (i) le signal émis par la surface et atténué par l'atmosphère, (ii) une part d'émission atmosphérique incidente réfléchi par la surface observée et atténuée par l'atmosphère, (iii) une part d'émission propre de l'atmosphère. Ils sont également dépendants de la distance entre la surface observée et le capteur (Sugiura *et al.* 2007). La correction de ces effets peut être effectuée à partir de mesures de température de surface *in situ*, méthode cependant longue, coûteuse et peu adaptée en mode opérationnel. Les modèles de transfert radiatif constituent une autre solution de correction mais nécessitent l'utilisation de profils atmosphériques (de température, humidité, pression, aérosols, et molécules gazeuses) (Jacob *et al.* 2004). Ces profils, généralement issus de radiosondages, sont souvent indisponibles, ou ne coïncident pas dans le temps ou dans l'espace avec les acquisitions. Ils peuvent également être dérivés de modèles météorologiques dont la résolution spatiale (100 km) et temporelle (6 heures) n'est pas adaptée aux zones tropicales où les changements de conditions atmosphériques peuvent survenir très rapidement.

Nous présentons dans cet article une méthode originale de correction des images thermiques acquises par ULM au dessus du site expérimental de La Mare en 2007 par l'utilisation (i) d'un modèle de transfert radiatif (MATISSE, Modélisation Avancée de la Terre pour l'Imagerie et la Simulation des Scènes et de leur Environnement) (Simoneau *et al.* 2001) (ii) de mesures de température et d'humidité de l'air acquises par un capteur (HMP50, Campbell Scientific®) embarqué dans l'ULM à différentes altitudes de vol de manière à obtenir un profil atmosphérique.

Entre mai et septembre 2007, sept acquisitions aéroportées, couplées à des mesures de températures de surface *in situ* (sur cibles chaude, froide et intermédiaire) ont été réalisées au dessus de la parcelle de La Mare, aux alentours du midi solaire (Figure 31.a).

La caméra thermique (B20 HSV) embarquée dans l'ULM, ainsi que le radiothermomètre KT19, utilisé au sol, ont au préalable été étalonnés face à un corps noir. Les résultats indiquent une différence moyenne de 0.15 °C entre les deux capteurs et une précision inférieure à 0.4 °C par rapport à la température de référence du corps noir. Par conséquent, aucune correction n'a été appliquée à la température mesurée par ces capteurs.

Pour chaque altitude de vol (400, 600, 900, 1 200 m) (Figure 31.a) et chaque date, nous avons calculé les régressions linéaires entre les données infrarouge thermique aéroportées (T_s , mesurées par la caméra thermique B20HSV) et *in situ* (T_g - Radiothermomètre KT19) acquises sur les cibles. Pour une date d'acquisition donnée, les résultats montrent que la température de surface acquise au niveau de l'ULM décroît quand l'altitude augmente. Pour une altitude donnée, la différence entre les termes de la régression linéaire d'une date à une autre met en évidence la forte variabilité des effets atmosphériques pouvant être observée sur la zone.

Ces résultats soulignent la nécessité d'une caractérisation en temps réel des profils atmosphériques, solution adoptée dans cette étude, par l'utilisation d'un capteur de température et d'humidité de l'air embarqué dans l'ULM. La Figure 31.b, qui présente deux profils atmosphériques acquis à la même date (le 05/09/07), l'un par notre capteur, l'autre par un radiosondage lancé 1h45 avant nos acquisitions, illustre un fonctionnement satisfaisant du capteur HMP50 en vol. Pour cette même date, nous avons utilisé MATISSE pour simuler les températures collectées au sol au niveau de la caméra embarquée en utilisant les deux sources de données atmosphériques (le capteur HMP50 embarqué et le radiosondage). Les températures simulées ont ensuite été comparées aux températures réellement acquises au niveau de l'ULM. Les résultats obtenus à partir des données acquises par le capteur HMP50 présentent une plus grande précision que ceux obtenus par l'utilisation des radiosondages (RMSE = 0.49 °C contre 0.63 °C pour le radiosondage).

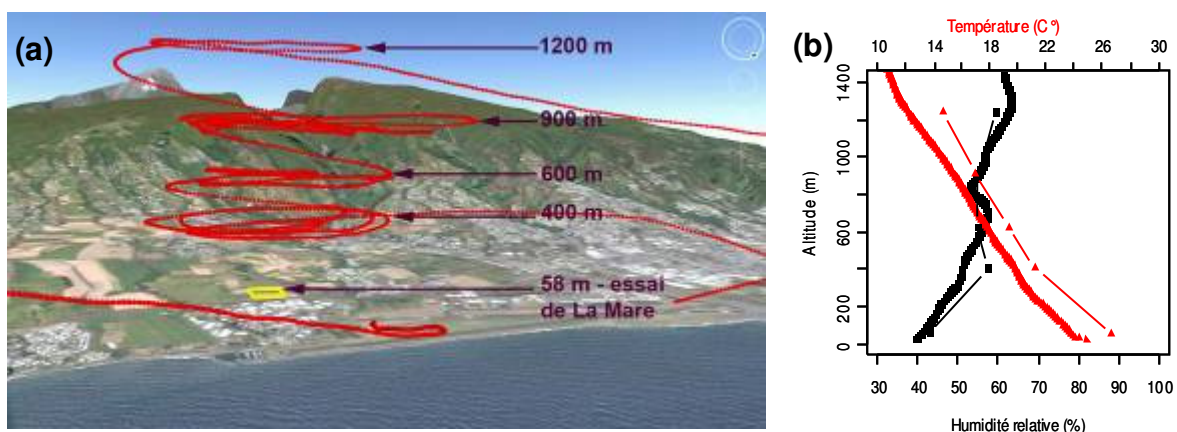


Figure 31 : (a) Illustration des paliers effectués à différentes altitudes au dessus de l'essai de La Mare le 5 septembre 2007. Les points rouges représentent l'enregistrement de la trace GPS de l'ULM au cours du vol. La parcelle est détournée en jaune. (b) Profils atmosphériques de température et d'humidité relative enregistrés le 05/09/2007 par le capteur HMP50 (Campbell Scientific®) entre 11h30 et 12h00 (lignes fines) et par le radiosondage lancé à 10h00 (lignes épaisses) à 2 km du lieu d'étude.

Les mêmes comparaisons ont été effectuées entre les résultats de simulation des températures observées au sol issus de MATISSE, utilisé avec les profils atmosphériques aéroportés, et les mesures observées en vol par la caméra pour toutes les dates d'acquisition et toutes les altitudes. Les résultats, présentés en Figure 32, indiquent que la température observée en vol au niveau de la caméra est correctement simulée par le modèle utilisé avec les profils atmosphériques enregistrés à bord de l'ULM.

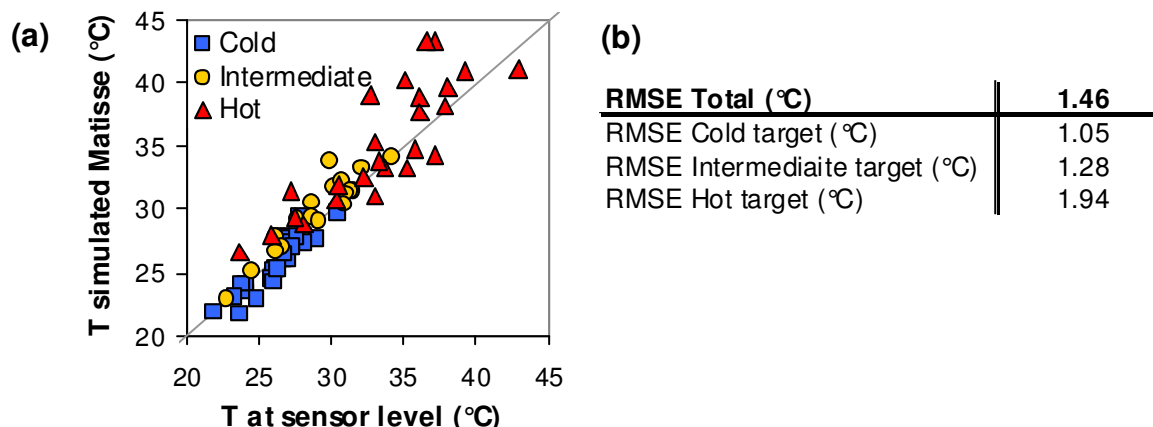


Figure 32 : (a) Relation entre les températures mesurées par la caméra embarquée dans l'ULM et les températures simulées par MATISSE à partir des profils atmosphériques acquis par le capteur HMP50 pour l'ensemble du jeu de données. (b) Root Mean Square Errors entre les températures simulées et observées en vol.

En conclusion, la méthode originale proposée dans cette étude pour corriger les effets atmosphériques sur des images infrarouges thermiques aéroportées via l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif et de profils atmosphériques enregistrés à bord de l'ULM montre une précision suffisante pour le développement d'indices de stress des cultures (la RMSE observée sur les cibles froides, correspondant à la canopée étant proche de 1 °C).

III.2 De la mesure à l'indicateur

L'article 3, « **An airborne imaging system for diagnosis of water and nutrient variability in sugarcane crop** », (soumission en avril 2009 à *Field Crops Research*, FI = 1.66) aborde la problématique du diagnostic de l'état hydrique et nutritionnel par télédétection, dans le cas de stress croisés (eau * azote).

L'azote et l'eau sont les principaux intrants permettant une augmentation significative de la productivité de la culture de la canne à sucre (Wiedenfeld 1995). Il existe également un fort lien entre la disponibilité en eau et l'assimilation de l'azote par la culture, cette dernière pouvant être réduite en cas de stress hydrique (Ingram and Hilton 1986). Ces aspects montrent l'importance d'une estimation précise de la distribution spatiale de l'état hydrique et nutritionnel de cette culture pour la gestion raisonnée des intrants. L'imagerie aéroportée peut fournir des informations pertinentes pour le suivi

non-destructif de l'état hydrique et nutritionnel des cultures, via la mesure des propriétés spectrales et thermiques de la canopée (Moran 2000; Moran *et al.* 2003; Moran *et al.* 1997; Pinter Jr. *et al.* 2003).

Le stress azoté peut ainsi être estimé par l'étude de la réponse spectrale de la canopée dans les bandes d'absorption chlorophyllienne (bandes Bleu et Rouge) qui sont à l'origine de nombreux indices d'état azoté des cultures (Carter and Miller 1994; Penuelas *et al.* 1995a; Penuelas *et al.* 1994; Penuelas *et al.* 1993).

Les indices de stress hydrique basés sur des mesures de température de la canopée, dont le plus connu est le Crop Water Stress Index (CWSI) (Idso 1982; Jackson *et al.* 1981) sont restreints aux cultures couvrantes. Lorsque les données infrarouges thermiques sont acquises à la verticale, par voie aéroportée, leur interprétation en tant qu'indices de stress hydrique est bruitée par la portion de sol pouvant être vue par le capteur. C'est pourquoi Moran *et al.* (1994) ont développé l'approche VIT (Vegetation Index / Temperature), qui permet l'application du CWSI aux cultures partiellement et totalement couvrantes. Cette approche est basée sur la relation entre ($T_s - T_a$) (différence entre la température de surface et celle de l'air) et d'un indice spectral de végétation, comme le NDVI (Rouse *et al.* 1973) représentant le taux de couverture de la culture (Figure 33.a). Ce concept est à la base d'indices de stress hydrique tels que le Water Deficit Index (WDI) (Moran *et al.* 1994). Cependant, le NDVI, utilisé dans l'approche VIT est à la fois influencé par les propriétés structurales et biochimiques de la canopée, limitant sa capacité à estimer une variable unique (telle que le taux de couverture dans notre cas). Ainsi, nous émettons ici l'hypothèse que, dans le cas d'un stress croisé eau * azote, l'effet de l'azote sur la teneur en chlorophylle des tissus foliaires aura une influence sur le NDVI, affectant la capacité des indices basés sur l'approche VIT à estimer le stress hydrique.

L'objectif de cette étude est d'examiner la capacité d'un système d'acquisition d'images multispectrales (visible, proche infrarouge et thermique) pour la caractérisation de l'état hydrique et nutritionnel de la culture de la canne à sucre dans le cas de stress croisés en : (i) testant un indice spectral pour caractériser l'état azoté de la culture à travers l'étude de la couleur des feuilles, (ii) proposant une méthode permettant de corriger la couleur des feuilles pour une meilleure sensibilité du NDVI au taux de couverture, (iii) évaluant cette correction sur la capacité du WDI à caractériser l'état hydrique des plantes dans le cas de stress croisés eau * azote.

Pour cela nous avons utilisé les données issues de l'expérimentation organisée sur l'essai de La Mare en 2007 (essai couplant deux variétés, deux régimes hydriques et trois niveaux d'apports azotés) (Figure 11). Les mesures radiométriques ont été réalisées à partir d'un ULM équipé d'un système d'acquisition multispectral large bande constitué d'appareils photographiques numériques (Lebourgeois *et al.* 2008a) mesurant le signal dans le visible et le proche infrarouge, et d'une caméra thermique (Lebourgeois *et al.* 2008b) pour les mesures de température de surface. Entre mai et septembre 2007, ont eu lieu sept campagnes aéroportées, couplées à des mesures au sol. Les mesures au sol ont concerné : (i) les conditions environnementales (pluie, irrigation, température de l'air), (ii) des relevés agronomiques (LAI, SPAD, humidité des gaines).

Après corrections radiométrique et géométrique des images aéroportées (Lebourgeois *et al.* 2008a ; Lebourgeois *et al.* 2008b), nous avons calculé trois indices : (i) le NDVI, (ii) une version large bande

du Simple Ratio Pigment Index¹, calculé par le rapport des bandes Bleu et Rouge (notée $SRPI_b$), (iii) le WDI (une illustration de l'évolution temporelle de ces trois indices est visible en Annexe 7). Le calcul du WDI nécessite la détermination des quatre bornes du trapèze formé par le nuage de points reliant $(T_s - T_a)$ au NDVI (Figure 33.a). Ces bornes peuvent être définies de manière théorique à partir de mesures *in situ* (rayonnement net, vitesse du vent, température de l'air, pression de vapeur saturante, résistances stomatiques maximales et minimales) ou de manière empirique lorsque la scène considérée inclue les quatre états de surface (Clarke 1997). Pour extraire de manière automatique les contours du trapèze, nous avons développé dans cette étude une méthode statistique permettant la définition des bornes du WDI par régression quantile (Figure 33.b).

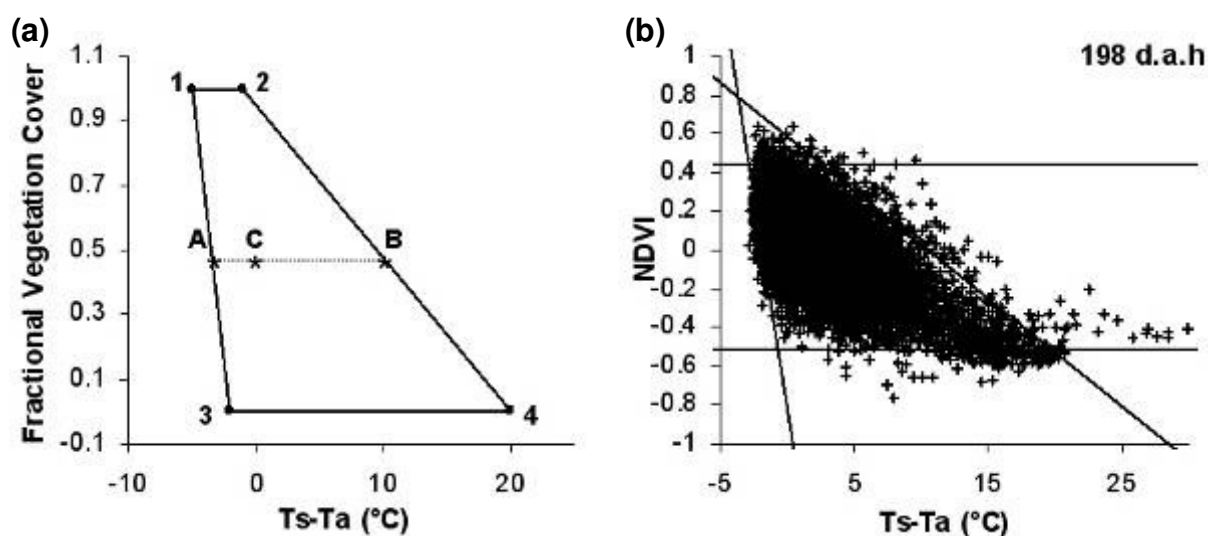


Figure 33 : (a) Illustration de l'approche VIT et du calcul du WDI. 1 : végétation couvrante irriguée, 2 : végétation couvrante en stress hydrique, 3 : sol nu saturé, 4 : sol nu sec. Pour un point C, le WDI est égal au rapport entre AC et AB. (b) Exemple de contours du trapèze définis par la méthode statistique sur la première date d'acquisition du jeu de données aéroporté (198 days after harvest).

Nous avons ensuite dans un premier temps testé les capacités du $SRPI_b$ à estimer l'état azoté de la culture. Les résultats de la régression linéaire entre le $SRPI_b$ et les mesures de SPAD (étroitement liées à l'état azoté) mettent en évidence une très forte corrélation entre ces deux variables ($R^2 = 0.83$) qui se révèle indépendante de l'état hydrique de la plante (Figure 34.a).

Pour corriger l'effet de la couleur des feuilles sur le NDVI, nous avons mis en relation le $SRPI_b$ avec le NDVI pour différents niveaux de LAI et déterminé une équation de correction, permettant de ramener le NDVI des placettes en stress nutritionnel à une valeur de NDVI de référence.

La capacité du WDI à caractériser le stress hydrique dans le cas de stress croisés (eau * azote) a également été testée. Pour cela, les WDI obtenus sur chacun des traitements et chacune des dates ont été comparés à notre indicateur *in situ* d'état hydrique de la plante (humidité des gaines, notée SH et exprimée en %). La même comparaison a été effectuée entre l'humidité des gaines et la version corrigée du WDI (notée WDI_{cor}). Cette dernière est calculée sur la base du trapèze reliant $NDVI_{cor}$ à $(T_s - T_a)$. Les résultats montrent une corrélation négative entre le WDI et SH ($R^2 = 0.41$) et une influence du traitement azoté (les ordonnées à l'origine des droites de régression par traitement azoté

¹ $SRPI = \rho_{430nm} / \rho_{680nm}$, où ρ est la réflectance.

étant significativement différentes). Ces résultats prouvent que WDI ne reflète pas seulement l'état hydrique de la plante, mais également qu'il est également influencé par son état azoté.

Les résultats de régression linéaire entre le WDI_{cor} et l'humidité des gaines (Figure 34.b) montrent une plus forte corrélation ($R^2 = 0.57$). Les pentes et ordonnées à l'origine des régressions liant WDI_{cor} à SH ne sont pas significativement différents entre traitements azotés. Ces résultats indiquent que le WDI_{cor} n'est sensible qu'à l'état hydrique de la plante.

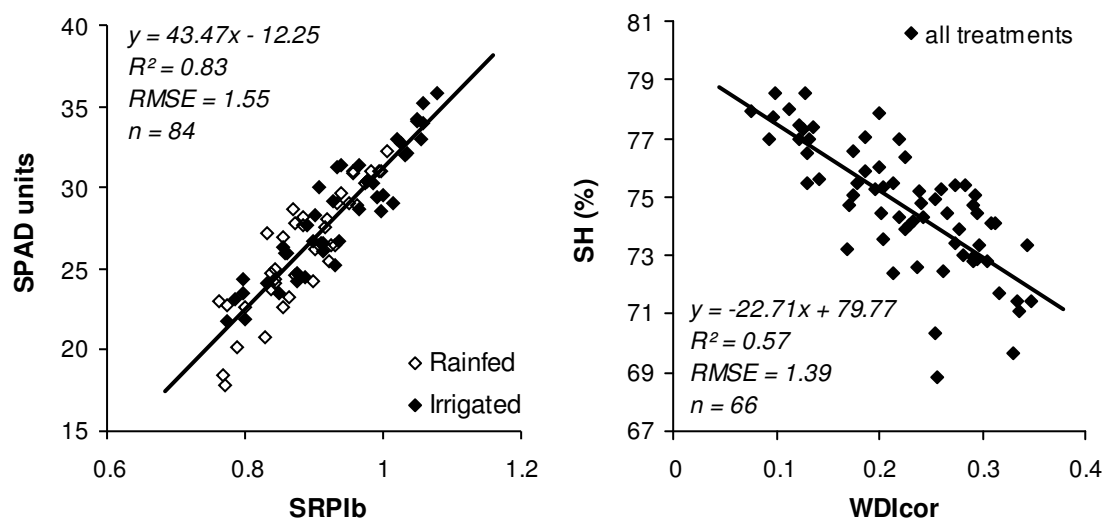


Figure 34 : (a) Régression linéaire entre le SRPIb et les valeurs de SPAD, (b) Régression linéaire entre le WDI_{cor} et l'humidité des gaines (SH).

En conclusion, les résultats de cette étude confirment notre hypothèse de départ concernant l'influence de l'état azoté de la culture sur l'indice de stress hydrique (le WDI) issu de l'approche VIT. L'élaboration d'une équation de correction générique pourrait permettre de corriger les effets de l'état azoté sur le NDVI et ainsi le rendre plus apte à estimer le taux de couverture de la culture. L'indice $SRPI_b$ peut quant à lui être utilisé pour estimer l'état azoté de la plante indépendamment de son état hydrique. Si des recherches plus approfondies restent nécessaires (notamment en travaillant avec une gamme de LAI plus étendue et en choisissant un indicateur *in situ* de l'état hydrique plus en phase avec le WDI), ces premiers résultats mettent tout de même en évidence l'aptitude du système d'acquisition mis en place à faire la distinction entre un stress nutritionnel et un stress hydrique dans le cas de stress croisés.

III.3 De l'indicateur au conseil

Les indices de stress hydrique calculés à partir des données infrarouge thermique sont présentés dans la littérature comme des outils d'aide à la planification des irrigations, mais ne permettent pas le calcul des quantités d'eau à apporter à la parcelle (Nielsen 1990). Pour faire le lien entre l'indicateur et le conseil, l'article 4 : « ***Toward a combined use of a thermal infrared water stress index and water balance modelling for irrigation monitoring on sugarcane crop*** », soumis à la revue *Agricultural Water Management* (FI = 1.39), propose des voies de couplage entre un indice de stress hydrique dérivé de données infrarouges thermiques et un modèle de bilan hydrique pour l'amélioration de la gestion de l'irrigation des cultures de canne à sucre en milieu humide.

Dans les régions humides, l'irrigation des cultures intervient souvent en complément de pluies irrégulières dans le temps et en quantité. Le calcul du régime hydrique complémentaire à apporter à la parcelle est par conséquent difficile à mettre en œuvre. De plus, à La Réunion, la variabilité des sols complique l'utilisation des méthodes traditionnelles de gestion de l'irrigation (bilan hydrique). D'autres approches incluent des mesures destructives (ex : teneur en eau des feuilles) ou des équipements sophistiqués (ex : mesure du flux de sève) difficiles à mettre en œuvre (Jones 2004). C'est pourquoi Chopart *et al.* (2007) ont développé OSIRI, un outil de conseil à l'irrigation adapté à un environnement hétérogène et à des petits agriculteurs. Actuellement utilisé à l'île de La Réunion, il est basé sur un modèle de bilan hydrique (PROBE) (Chopart and Vauclin 1990) couplé à des règles de décision simples et compréhensives. Cependant, pour être précise, la modélisation du bilan hydrique nécessite des informations sur l'état du sol (Clothier and Green 1994; Green *et al.* 2006), des mises à jour régulières (permettant de prendre en compte les pluies réelles) (Jones 2004), ou des vérifications *in situ* de l'état hydrique de la plante. Nous proposons dans cette étude de tester l'utilisation de la version empirique du Crop Water Stress Index ($CWSI_e$ qui correspond à $1 - ETR / ETP^1$) (Idso 1982), indice dérivé de mesures de température de la canopée, pour l'estimation non-destructive de l'état hydrique de la canne à sucre, pour une meilleure gestion de l'irrigation.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur la campagne expérimentale menée en 2007 et 2008 sur l'essai de Tirano (Figure 12), dans le sud de La Réunion, où la canne est irriguée en complément des pluies. Nous avons suivi les termes du bilan hydrique du sol, ainsi que l'état hydrique de la plante, dérivé de mesures infrarouges thermiques sur un essai (Tirano, cf. Figure 12) présentant des régimes hydriques contrastés (pluvial - RAIN, ou irrigué - IRR selon le conseil OSIRI).

Des mesures de température de surface ont été réalisées chaque jour grâce à quatre capteurs infrarouges thermiques IRR-P (Apogée®) installés au-dessus de la canopée sur différents traitements (pluvial - RAIN, ou irrigué - IRR selon le conseil OSIRI) (cf. Figure 12). Simultanément étaient enregistrées les conditions météorologiques (température et humidité de l'air, rayonnement global). Des mesures d'humidité du sol et de drainage ont été utilisées pour dériver le rapport entre l'évapotranspiration réelle et maximale de la plante (ETR/ETM) dont les valeurs ont été moyennées

¹ ETR = Evapotranspiration réelle, ETP = Evapotranspiration potentielle

sur des périodes homogènes en termes de conditions hydriques. Seules les valeurs de température de canopée acquises par jours clairs en 2007, une heure après le midi solaire, ont été utilisées pour définir les lignes de base (stressée et non-stressée) requises pour le calcul du $CWSI_e$ (Figure 35). Ces lignes de base sont définies par le rapport entre $(T_c - T_a)$ et le VPD (Vapor Pressure Deficit, dérivé des mesures de température et d'humidité de l'air), supposé linéaire dans des conditions d'apport en eau non limitantes (ligne de base non stressée, *ll*) (Idso 1982), et maximal et indépendant du VPD en cas d'un fort stress hydrique (ligne de base stressée, *ul*) (Figure 35).

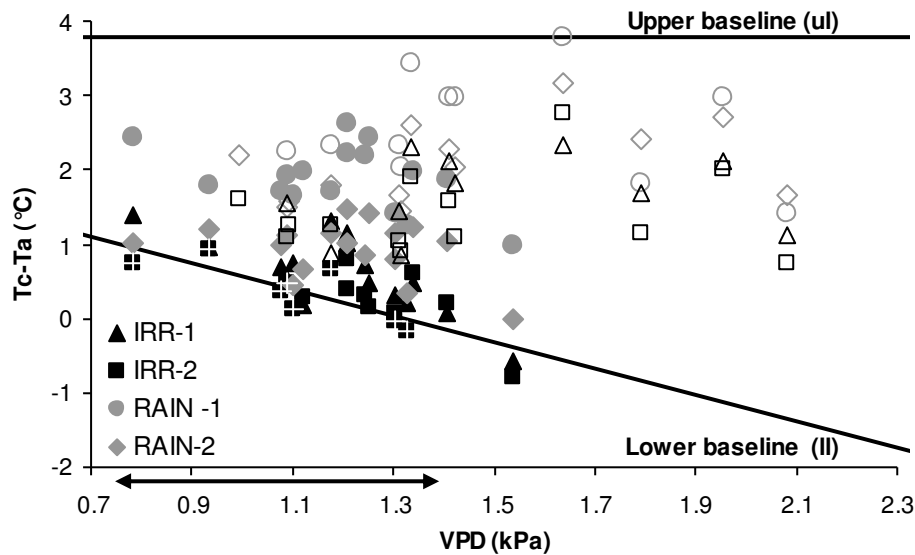


Figure 35 : Valeurs moyennes de $(T_c - T_a)$ et du VPD acquises entre 13 :30 et 14 :00 pour les 4 traitements par jour clair au cours de l'expérimentation de 2007. Les symboles vides représentent les données acquises après l'arrêt de l'irrigation. La double flèche noire indique la gamme de VPD utilisée pour la définition de la ligne de base non stressée (*ll*). Les croix blanches présentent les points utilisés pour la définition de cette dernière. Le $CWSI_e$ est ensuite calculé comme suit : $[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{ll}] / [(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{ll}]$, où $(T_c - T_a)_m$ est la différence mesurée entre la température de la canopée et celle de l'air.

Les lignes de bases définies en 2007 ont été utilisées pour calculer le $CWSI_e$ sur 2007, mais également en 2008, afin de tester la robustesse de la méthode utilisée.

Les régressions linéaires entre ETR/ETM (AET/MET en anglais) et les valeurs $(1 - CWSI_e)$ moyennées sur les mêmes périodes montrent une corrélation significative ($R^2 = 0.75$, $RMSE = 0.12$, $p < 0.0001$) pour les deux années d'expérimentation (Figure 36).

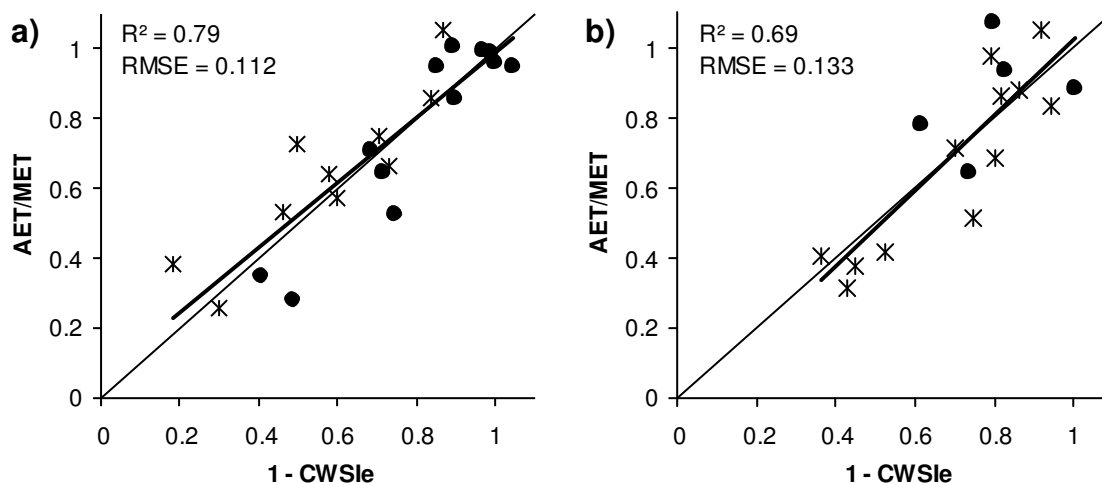


Figure 36 : Régressions linéaires entre $(1 - CWSI_e)$ et AET/MET pour (a) quatre traitements en 2007, et (b) trois traitements en 2008. Les croix et les cercles représentent les traitements irrigués et pluviaux respectivement.

Ces résultats traduisent l'efficacité et la robustesse du $CWSI_e$ à caractériser l'état hydrique de la canne, même en conditions humides, où les faibles gammes de VPD observées (ici entre 0.5 et 2.1) rendent difficile la détermination de la ligne de base non-stressée (Gardner *et al.* 1992).

Dans cette étude, nous avons travaillé en milieu contrôlé, avec une connaissance préalable des caractéristiques du sol de l'essai nécessaire au bon fonctionnement de l'outil OSIRI. En exploitation, (i) ces caractéristiques sont rarement connues et doivent être estimées par les agriculteurs ou les techniciens agricoles, entraînant de possibles erreurs dans le conseil à l'irrigation, (ii) la qualité du conseil est liée à la fréquence de re-calculation du bilan hydrique, en prenant en compte les pluies réelles, étape difficile à réaliser par les agriculteurs qui ne possèdent pour la plupart pas d'ordinateur.

Considérant ces limitations, une estimation *in situ* de l'état hydrique de la plante par des mesures non destructives via le $CWSI_e$ pourrait constituer une aide pour (i) le réajustement des variables d'entrée (caractéristiques du sol) dans l'outil OSIRI afin de fournir un conseil au plus proche de la réalité, (ii) assister les agriculteurs dans leurs choix concernant la planification de l'irrigation (choix du redémarrage) après un événement pluvial, (iii) contrôler que les quantités d'eau apportées à la parcelle sont en accord avec les recommandations de l'outil OSIRI.

IV. Conclusion et perspectives opérationnelles

Pour répondre à la nécessaire augmentation de productivité qui permettra d'assurer l'avenir de la culture de la canne à sucre à La Réunion, l'agriculture de précision, en proposant une gestion plus raisonnée des intrants, offre une solution de choix, mais également d'avenir, en intégrant l'idée de gestion durable de l'environnement.

C'est la voie exploitée dans ces travaux de thèse dans lesquels la télédétection est utilisée pour la caractérisation spatio-temporelle de l'état nutritionnel et hydrique de la culture de la canne. Cet objectif soulève des problématiques d'ordre technologique et agronomique, auxquelles nous avons essayé de répondre dans ce document

Apports technologiques : du signal à la mesure

Les applications en agriculture de précision utilisant la télédétection requièrent (i) des images à très haute résolution spatiale pouvant être acquises à une fréquence élevée, (ii) l'utilisation de capteurs mesurant le signal réfléchi et émis par la végétation dans les longueurs d'onde montrant un intérêt pour le suivi des cultures (optique réflectif et thermique), (iii) la quantification précise du signal mesuré par ces capteurs. Cette dernière étape nécessite l'identification des sources de distorsion radiométriques d'origine environnementale ou interne aux capteurs pouvant affecter le signal, ainsi que le développement de méthodologies permettant leur correction. Dans un objectif opérationnel, nous pourrions ajouter (iv) la notion d'indépendance du système d'acquisition vis-à-vis des données extérieures/complémentaires souvent nécessaires à la calibration des images acquises.

(i) Sur la résolution spatiale et temporelle...

Le choix du vecteur utilisé pour les acquisitions aéroportées (ULM) a permis l'obtention de données à très haute résolution spatiale (~10 cm dans le domaine optique réflectif, ~60 cm dans l'infrarouge thermique lorsque le vol est réalisé à une altitude de 600 m), mais également temporelle, ce type d'appareil n'étant contraint que par les conditions météorologiques (vitesses de vent > 35 km/h).

(ii) Sur le choix des capteurs...

Au cours de ces travaux, nous avons développé un système d'acquisition d'images original et complet, composé d'appareils photographiques numériques du commerce pour les acquisitions dans le domaine optique réflectif, et d'une caméra thermique pour les mesures dans l'infrarouge thermique. Nous avons démontré que les appareils photographiques numériques du commerce peuvent être utilisés pour effectuer des mesures radiométriques dans n'importe quelle longueur d'onde, large ou étroite, entre 400 nm et 900 nm, moyennant des modifications interne (retrait du filtre de rejet de l'infrarouge) et externe (adaptation d'un filtre passe-bande correspondant à la longueur d'onde souhaitée) de l'appareil. Des recommandations sont tout de même données pour l'obtention d'images

nettes lorsque le filtre utilisé est étroit, le temps de pose nécessaire, combiné aux vibrations de l'ULM pouvant affecter la netteté des images.

(iii) Sur la quantification précise du signal....

Nous avons développé puis testé sur un jeu de données expérimental une chaîne de prétraitements permettant l'utilisation d'appareils photographiques numériques du commerce pour des applications nécessitant une quantification du signal. Les résultats mettent en évidence la nécessaire correction des effets liés au vignettage, notamment dans le cas des appareils modifiés. Nous préconisons l'utilisation d'images au format RAW (pas de contraintes sur les réglages de l'appareil) et le calcul d'indices de végétation basé sur des rapports de bandes spectrales si les images sont acquises dans des conditions environnementales et de visée comparables. Dans le cas contraire il faut alors procéder à la délicate opération de normalisation radiométrique, basée sur des cibles invariantes.

Nous avons également mis au point une méthode originale permettant la correction des effets atmosphériques sur les images thermiques acquises par voie aéroportée via l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif (MATISSE) et de profils atmosphériques issus d'un capteur de température et d'humidité de l'air embarqué dans l'ULM. Les résultats de simulation montrent une précision de mesure d'environ un degré après prise en compte des effets atmosphériques.

(iv) Sur l'indépendance du système d'acquisition....

En mode opérationnel, les systèmes d'acquisition utilisés en agriculture de précision ne doivent pas être contraints ou dépendants de données extérieures. C'est le cas du système développé dans cette thèse, qui, associé aux méthodes originales de correction des images, ne nécessite pas de données extérieures (ex : radiosondages atmosphériques pour la correction des images thermiques) pour aboutir à un signal quantifié. Les quelques données complémentaires nécessaires sont micro-météorologiques (ex : température de l'air), et peuvent, dans le cas de La Réunion, être récupérées auprès des 44 stations météorologiques fonctionnant en routine sur l'île.

Le système d'acquisition mis en place, couplé aux méthodes d'étalonnage et de prétraitement des images permet donc l'obtention de mesures radiométriques précises, quantifiées et comparables entre elles d'une date à l'autre. C'est le pré-requis indispensable au développement d'indicateurs d'état de la plante et à leur suivi temporel.

Apports agronomiques : de la mesure à l'indicateur...

Nous avons au cours de cette thèse travaillé sur deux types d'informations acquises par télédétection : (i) des images multispectrales (visible, proche infrarouge, infrarouge thermique) acquises par voie aéroportée, (ii) des mesures localisées de température de surface du couvert, acquises en continu par des capteurs fixes installés *in situ*, au dessus de la canopée.

Les mesures de température de surface, couplées à des données météorologiques (température de l'air, pression de vapeur saturante) ont servi au calcul d'un indicateur de stress hydrique (version empirique du Crop Water Stress Index, notée $CWSI_e$). Malgré le peu d'études montrant l'efficacité de cet indice en milieu humide, nos résultats montrent la capacité du $CWSI_e$ à estimer avec précision l'état hydrique de la canne à sucre dans le cas de cultures couvrantes.

Les capacités du système d'acquisition aéroporté à caractériser indépendamment un stress nutritionnel (azoté) et un stress hydrique dans le cas de stress combinés ont également été testées sur un jeu de données expérimental. La version « large bande » du Simple Ratio Pigment Index (notée $SRPI_b$), calculée par le rapport entre les bandes spectrales bleu et rouge des images, montre une très forte corrélation avec l'indicateur *in situ* d'état azoté de la plante (SPAD) et s'avère être indépendante du régime hydrique de la plante. Le Water Deficit Index (WDI), indice conçu pour l'estimation du stress hydrique des cultures partiellement ou totalement couvrantes montre une sensibilité à l'état azoté de la plante, altérant sa capacité à estimer l'état hydrique de la plante dans le cas de stress croisés eau * azote. Nous montrons que, lorsque l'effet de la couleur des feuilles est corrigé sur le NDVI, la sensibilité du WDI à l'état hydrique augmente.

Apports agronomiques : ...de l'indicateur au conseil

Les indicateurs issus de mesures effectuées par télédétection utilisés dans ces travaux permettent d'identifier la cause du stress subi par la plante et d'en définir l'intensité. Ces indicateurs constituent donc des outils d'aide à la décision permettant à l'agriculteur d'obtenir une information spatialisée sur l'état de ses parcelles. L'étape permettant de passer de l'indicateur de stress de la culture à un conseil adapté (planification mais surtout dosage des intrants) nécessite une phase supplémentaire comme l'établissement de tables de correspondance, ou le couplage avec un modèle agronomique.

Dans le cas de la gestion de l'irrigation, les indicateurs d'état hydrique de la plante issus de données infrarouge thermique permettent la planification de l'irrigation (aide à la décision quant au déclenchement ou non de l'irrigation), mais ne permettent pas de calculer les quantités d'eau à apporter à la parcelle. Nous proposons dans ce document des voies de couplage entre un indicateur de stress hydrique (le $CWSI_e$) et un modèle de bilan hydrique (PROBE – utilisé dans l'outil de conseil à l'irrigation OSIRI). Cette démarche exploratoire a pour objectif de fournir à la parcelle un conseil au plus proche de la réalité, par l'estimation *in situ* de l'état hydrique de la plante via le $CWSI_e$ qui pourrait être utilisé pour (i) vérifier que le modèle se comporte bien vis-à-vis de la réalité (contrôle de l'état hydrique et réajustement éventuel des variables d'entrée du modèle), (ii) assister directement l'agriculteur pour la planification des irrigations.

Perspectives de recherche

Les résultats de ces travaux de thèse ouvrent des perspectives de recherche concernant l'amélioration des méthodes développées, ou l'utilisation du système d'acquisition pour des applications agronomiques autres que la caractérisation des stress hydriques et nutritionnels.

Dans un premier temps, il serait intéressant de pouvoir étalonner les appareils photographiques numériques (visible, rededge et proche infrarouge) en réflectance, de manière à obtenir des relations génériques entre état de la plante et indicateurs spectraux. La possibilité d'adapter différents filtres étroits sur les appareils photographiques numériques pourrait également permettre le développement d'un système d'acquisition d'images dans d'autres bandes spectrales. Un tel système permettrait de calculer et de tester des indices d'état nutritionnel basés sur des bandes spectrales étroites, tels que le Simple Ratio Pigment Index, ou encore le Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index. Enfin, de même que pour les indices de stress hydrique, couplés avec l'outil de conseil OSIRI, trouver et calibrer un moyen de quantifier les doses d'azote à apporter à la parcelle à partir d'un indice spectral d'état nutritionnel permettrait d'effectuer le lien entre l'indicateur et le conseil.

Concernant les indices de stress hydriques, les résultats obtenus pour la caractérisation de l'état hydrique de la plante via le $CWSI_e$ pourraient être approfondis (i) en testant la généralité de la méthode de calcul (lignes de bases) sur l'ensemble de la zone irriguée de l'île, en conditions météorologiques contrastées, et sur plusieurs années, (ii) en spatialisant le $CWSI_e$ en effectuant les acquisitions par voie aéroportée afin de délimiter des zones de gestion de l'irrigation au sein des parcelles / exploitations. Concernant la caractérisation de l'état hydrique via le WDI, les résultats pourraient être consolidés, notamment (i) en complétant le jeu de données par des mesures sur des couverts plus jeunes pour élargir la gamme des taux de couverture observés, et sur d'autres variétés, (ii) en élaborant une méthode robuste de correction de l'effet de la couleur des feuilles sur le NDVI, (iii) en validant la méthode avec des mesures de bilan hydrique.

Enfin, le système d'acquisition mis en place pour ces travaux montre également un intérêt dans d'autres applications agronomiques. On pourrait ainsi (i) s'intéresser aux relations entre les indices spectraux et/ou thermiques et le rendement de la culture dans l'objectif d'estimer et de prévoir la production en termes de tonnage et de richesse, (ii) étudier par voie aéroportée le comportement spectral du couvert de la canne en cas de problème phytosanitaire (ex : parasites) afin de cartographier les zones infectées.

Perspectives opérationnelles et voies de transfert

L'indépendance du système d'acquisition développé vis-à-vis de données complémentaires et son faible coût en font un système adapté à un fonctionnement opérationnel. La mise en place de relations

« indicateurs – état » génériques et calibrées sur la zone de production réunionnaise pourrait permettre une cartographie des états de surface des cultures de canne et ainsi ouvrir la voie de l'agriculture de précision à cette région d'Outre Mer.

Si la production réunionnaise paraît modeste par rapport au contexte international, les résultats issus des recherches menées dans cette région n'en sont pas néanmoins transférables à d'autres zones de production. En effet, pour la culture de la canne à sucre, La Réunion constitue un « petit laboratoire » dans lequel sont représentées de nombreuses conditions climatiques de production permettant l'exportation des méthodes de suivi développées.

Liste des figures

Figure 1 : Production mondiale de sucre en millions de tonnes à partir de la canne à sucre et de la betterave sucrière, de 1840 à 2005 (Source : Secrétariat de la CNUCED d'après les données statistiques du Sugar Trading Manual (2000) et des estimations du Secrétariat).....	17
Figure 2 : Surfaces cultivées en canne à sucre et modes d'irrigation (Source : BD parcellaire, DAF 2005, Fond : CNES 2005, distribution Spot Image).....	18
Figure 3 : Classification des exploitations cannières selon leur surface en canne (Source : DAF Réunion, Février 2006).	18
Figure 4 : Evolution du tonnage des cannes traitées et du sucre produit de 1995 à 2005 (Source : Les industriels du Sucre : Sucrière de La Réunion / Sucrierie de Bois Rouge, Dossier de Presse Campagne Sucrière 2005).	19
Figure 5 : Evolution des surfaces cultivées au cours des 25 dernières années (Source : CTICS 2005)	20
Figure 6 : Tallage et élongation de la canne au cours du cycle d'une repousse (Langellier 1990). Les données ont été collectées à La Réunion, station de Ligne Paradis, pluviométrie annuelle de 1 000 mm, altitude 180 m.	23
Figure 7 : Evolution LAI pour 2 cultivars en replantation, et 2 traitements (irrigué / sec). Le traitement « sec » correspond à un arrêt de l'irrigation qui a débuté 5 mois après la plantation (adapté de (Smit and Singels 2006)).	24
Figure 8 : Evolution de l'humidité (%) de différents organes selon l'âge (jours après coupe), au cours d'un arrêt de l'irrigation puis d'une remise en eau en période sèche. D'après (Martiné 1999)	24
Figure 9 : Evolution de la concentration en azote des feuilles (exprimée en % de matière sèche) pour une culture de canne à Porto Rico (adapté de (Fauconnier and Bassereau 1970)).	26
Figure 10 : Variations de la réflectance d'une feuille (a) et d'un couvert (b) selon l'état physiologique dans le visible (B, V, R : Bleu, Vert, Rouge), et dans le proche infrarouge (PIR) (adapté de (Girard and Girard 1999))	29
Figure 11 : Configuration des 36 placettes étudiées (variétés R579 et R570) sur la parcelle expérimentale de La Mare.	34
Figure 12 : Configuration des trois blocs (B1, B2, B3) de la parcelle expérimentale de Tirano en 2007 (R : pluvial, I1 : Osiri m.à.j / semaine, I2 : Osiri m.à.j / mois, I3 : Traitement ETM Chambre d'Agriculture) et en 2008 (I : témoin maintenu à l'ETM, R1 : rationné 0.7, R2 : rationné 0.5, R3 : rationné 0.3).....	35
Figure 13 : Les 3 appareils photographiques CANON® EOS 400D constituant le système d'acquisition optique de la campagne 2007 : un capteur RVB (gauche) et deux capteurs modifiés et équipés de filtres (PIR au milieu, rededge à droite).	37
Figure 14 : Réponse spectrale normalisée dans le bleu, le vert, le rouge, le rededge et le proche infrarouge (a) d'un appareil CANON® EOS 350D après retrait du filtre passe bande visible (b et c) des 2 jeux de capteurs optiques (350D et 400D). Les couleurs correspondent à chaque canal de la matrice du capteur (bleu, vert, rouge). La courbe standard de réflectance d'un couvert végétal est représentée en gris.	38
Figure 15 : Réponse spectrale relative de la caméra thermique B20 HSV (Flir Systems®). La réponse de la caméra thermique TH7800 (NEC®) n'est pas fournie par le constructeur.....	39

Figure 16 : Illustration du système d'acquisition aéroporté en 2007.	40
Figure 17 : Configuration des capteurs sur la parcelle de Silotia : (a) le mât et les capteurs, (b) schéma du dispositif (à gauche : traitement stressé, à droite : traitement irrigué).	43
Figure 18 : Régression exponentielle entre la surface de limbes verts totaux déroulés (SLVT), la hauteur des tiges (HTVD) et le nombre de limbes verts (NBLV)	44
Tableau 1: Coefficients et erreur standard de la régression exponentielle $SLVT = a * [1 - \exp(-b * HTVD * NBLV)]$, pour chaque variété (Martiné 2004).	44
Figure 19 : Illustration des mesures de température de surface réalisées simultanément aux vols à l'aide du radiothermomètre KT19 (Heitronics®) sur la canopée, et le chemin herbeux.	45
Figure 20 : Mise en place des capteurs sur la parcelle de Tirano : (a) capteurs météorologiques (anémomètre, capteur de température et d'humidité relative de l'air, pyranomètre), (b) vue d'ensemble, (c) capteur infrarouge thermique IRR-P (Apogée®), (d) schéma du dispositif.	46
Figure 21 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2006 – LA MARE	48
Figure 22 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2007 – LA MARE	49
Figure 23 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2007 – TIRANO	50
Figure 24 : CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2008 – TIRANO	51
Figure 25 : Facteurs impliqués dans le processus d'acquisition de l'image par un appareil photographique numérique : facteurs liés à l'environnement (boîtes bleues) et à l'appareil photographique (boîtes blanches).	52
Figure 26 : (a) Matrice CFA (Color Frame Array) d'un appareil photographique numérique CANON, (b) extraction d'images « spectralement pures »	53
Figure 27 : Exemple de filtre et de profil de vignettage (polynôme de degré 6) tiré de l'image moyenne des clichés acquis par le capteur PIR (DN : Digital Numbers). Le cercle rouge représente une perte de signal de 10 %.	54
Figure 28 : Coefficients de détermination des relations exponentielles liant le CC (LAI * SPAD) aux trois indices de végétation sur les 36 placettes et les 6 dates d'acquisition (jpg : format jpeg, raw : format brut décodé, dev : corrigé du vignettage, norm : normalisé par la méthode des invariants).	55
Figure 29 : Résultats d'étalonnage de la caméra thermique B20 HSV.....	56
Figure 30 : Profils de vignettage de la caméra thermique B20HSV et courbes de régression polynomiales (degré 2) : (a) profil horizontal, (b) profil diagonal.....	57
Figure 31 : (a) Illustration des paliers effectués à différentes altitudes au dessus de l'essai de La Mare le 5 septembre 2007. Les points rouges représentent l'enregistrement de la trace GPS de l'ULM au cours du vol. La parcelle est détournée en jaune. (b) Profils atmosphériques de température et d'humidité relative enregistrés le 05/09/2007 par le capteur HMP50 (Campbell Scientific®) entre 11h30 et 12h00 (lignes fines) et par le radiosondage lancé à 10h00 (lignes épaisses) à 2 km du lieu d'étude.	58
Figure 32 : (a) Relation entre les températures mesurées par la caméra embarquée dans l'ULM et les températures simulées par MATISSE à partir des profils atmosphériques acquis par le capteur HMP50 pour l'ensemble du jeu de données. (b) Root Mean Square Errors entre les températures simulées et observées en vol.	59
Figure 33 : (a) Illustration de l'approche VIT et du calcul du WDI. 1 : végétation couvrante irriguée, 2 : végétation couvrante en stress hydrique, 3 : sol nu saturé, 4 : sol nu sec. Pour un point C, le WDI est	

égal au rapport entre AC et AB. (b) Exemple de contours du trapèze définis par la méthode statistique sur la première date d'acquisition du jeu de données aéroporté (198 days after harvest). 61

Figure 34 : (a) Régression linéaire entre le SRPIb et les valeurs de SPAD, (b) Régression linéaire entre le WDIcor et l'humidité des gaines (SH). 62

Figure 35 : Valeurs moyennes de $(T_c - T_a)$ et du VPD acquises entre 13 :30 et 14 :00 pour les 4 traitements par jour clair au cours de l'expérimentation de 2007. Les symboles vides représentent les données acquises après l'arrêt de l'irrigation. La double flèche noire indique la gamme de VPD utilisée pour la définition de la ligne de base non stressée (II). Les croix blanches présentent les points utilisés pour la définition de cette dernière. Le CWSIe est ensuite calculé comme suit : $[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{II}] / [(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{II}]$, où $(T_c - T_a)_m$ est la différence mesurée entre la température de la canopée et celle de l'air. 64

Figure 36 : Régressions linéaires entre $(1 - CWSIe)$ et AET/MET pour (a) quatre traitements en 2007, et (b) trois traitements en 2008. Les croix et les cercles représentent les traitements irrigués et pluviaux respectivement. 65

Figure 37 : Variétés préconisées par le Cerf en fonction du zonage climatique réunionnais (Source : Cerf, 2006) 161

Figure 41 : Etapes du cycle de récolte de la canne à sucre à La Réunion 169

Figure 42 : Profils diagonaux de déformation géométrique des capteurs EOS 400D (CANON®) établis pour une distance focale égale à 35 mm 170

Figure 43 : Profil diagonal de déformation géométrique de la caméra thermique B20HSV (Flir Systems®) (distance focale = 36 mm). 170

Figure 44 : Illustration des images acquises dans le visible, le rededge, le proche infrarouge et l'infrarouge thermique le 29 juin 2007 au dessus de la parcelle de La Mare. 171

Figure 45 : Evolution temporelle du SRPIb sur la parcelle de La Mare. 172

Figure 46 : Evolution temporelle du NDVI sur la parcelle de La Mare. 173

Figure 47 : Evolution temporelle du WDI sur la parcelle de La Mare. 174

Références

- Artschwager, E. (1925). Anatomy of the vegetative organs of sugarcane. *Journal of Agriculture Research*, 30, 197-221
- Baret, F. (1999). Potentiels de la télédétection pour l'agriculture de précision. *L'enjeu français de l'agriculture de précision. Salon International du Machinisme Agricole* (pp. 8-11). Paris: INRA
- Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., Colaizzi, P.D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H., & Moran, M.S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In *5th International Conference on Precision Agriculture*,
- Bégué, A., Lebourgeois, V., Bappel, E., Todoroff, P., Pellegrino, A., Baillarin, F., & Siegmund, B. (2009). Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. *International Journal of Remote Sensing, Accepted February 2009*, 22
- Borden, R.J. (1944). A search for guidance in the nitrogen fertilization of sugar cane crop, Part II, The first ratoon crop. *Haw. Plant. Rec.*, 49, 259-312
- Borden, R.J. (1948). Nitrogen effects upon the yield and composition of sugarcane. *Haw. Planters' Rec*, 52
- Bose, P.K., & Thakur, K. (1977). Critical time of irrigation and nitrogen fertilisation under water deficit condition - review of work done at Sugarcane Research Institute, Pusa. *Indian Sugar*, 26, 809-811
- Carlson, T.N., & Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252
- Carter, G.A., & Knapp, A.K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.*, 88, 677-684
- Carter, G.A., & Miller, R.L. (1994). Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive wavebands. *Remote Sensing of Environment*, 50, 295-302
- Chabalier, P.F., Van De Kerchove, V., & Saint Macary, H. (2006). *Guide de la fertilisation organique à La Réunion*
- Chapman, L.S. (1994). Fertiliser N management in Australia. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. Conf*, 83-92
- Chopart, J.L., Mezino, M., Aure, F., Le Mezo, L., Mete, M., & Vauclin, M. (2007). OSIRI: A simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments. *Agricultural Water Management*, 87, 128-138
- Chopart, J.L., & Vauclin, M. (1990). Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 54, 1377-1384

- Clarke, T., Moran, M.S., Barnes, E., Pinter Jr., P., & Qi, J. (2001). Planar domain indices: a method for measuring a quality of a single component in two-component pixels. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney (AUSTRALIA), 9-13 July, unpaginated CD
- Clarke, T.R. (1997). An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. *Horticulture Technology*, 7, 9-16
- Clawson, K.L., & Blad, B.L. (1982). Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agronomy Journal*, 74, 311-316
- Clements, H.F., Martin, J.P., & Moriguchi, S. (1941). Composition of sugar cane plants grown in deficient nutrient solutions. *Haw. Plant. Rec.*, 45, 227-239
- Clothier, B.E., & Green, S.R. (1994). Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 25, 1-12
- Das, U.K. (1936). Nitrogen nutrition of sugarcane. *Plant. Phys.*, 11, 251-317
- Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., Brown de Colstoun, E., & McMurtrey, J.E. (2000). Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74, 229-239
- Déliot, P., Duffaut, J., & Lacan, A. (2005). Characterization and calibration of a high-resolution multi-spectral airborne digital camera. In *Proceedings of the 20th Congress of the International Commission for Optics*, Changchun, China, 21-25 August 2005, 603104:603101-603104:603110
- El-Shikha, D.M., Barnes, E.M., Clarke, T.R., Hunsaker, D.J., Haberland, J.A., Pinter Jr, P.J., Waller, P.M., & Thompson, T.L. (2008). Remote sensing of cotton nitrogen status using the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI). *Transactions of the ASABE*, 51, 73-82
- El-Shikha, D.M., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., & Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92, 183-193
- El Hajj, M., Bégué, A., Lafrance, B., Hagolle, O., Dedieu, G., & Rumeau, M. (2008). Relative Radiometric Normalization and Atmospheric Correction of a SPOT 5 Time Series. *Sensors*, 8, 2774-2791; doi:2710.3390/s8042774
- Erlher, W.L. (1973). Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agronomy Journal*, 65, 404-409
- Escobar, D.E., Everitt, J.H., Noriega, J.R., Cavazos, I., & Davis, M.R. (1998). A twelve-band airborne digital video imaging system (ADVIS). *Remote Sensing of Environment*, 66, 122-128
- Evans, H. (1935). Investigation on the root-system of sugarcane varieties. *Sug. Can. Res. Sta. Mauritius Bull.*, 44
- Everitt, J.H., Escobar, D.E., Cavazos, I., Noriega, J.R., & Davis, M.R. (1995). A three-camera multispectral digital video imaging system. *Remote Sensing of Environment*, 54, 333-337

- Fahrasmane, L., & Ganou-Parfait, B. (1997). *De la canne au rhum*
- Fauconnier, R., & Bassereau, D. (1970). *La canne à sucre*
- Filella, I., Serrano, L., Serra, J., & Penuelas, J. (1995). Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Science*, 35, 1400-1405
- Filella, J., & Penuelas, J. (1994). The rededge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1459-1470
- Fois, S., Motzo, R., & Giunta, F. (2009). The effect of nitrogenous fertiliser application on leaf traits in durum wheat in relation to grain yield and development. *Field Crops Research*, 110, 69-75
- Fuchs, M. (1990). Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 253-261
- Fusijada, H. (1998). ASTER Level-1 data processing algorithm. In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1101-1112
- Fusillier, J.L., Choisis, J.P., & Lejars, C. (2007). Les nouvelles aides à l'agriculture : L'impact de la réforme Economie de La Réunion. *Revue de l'INSEE*, 23-33
- Gamon, J.A., Peñuelas, J., & Field, C.B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35-44
- Gardner, B.R., Blad, B.L., Garrity, D.P., & Watts, D.G. (1981). Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrigation Science*, 2, 213-224
- Gardner, B.R., Blad, B.L., & Shock, C.C. (1992). Infrared thermometry and the crop water stress index. I. History, theory, and baselines. *Journal of production agriculture*, 5, 462-466
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C., & Weidner, V.R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4, 11-20
- Gaudin, R. (1999). Incidence de l'eau sur la culture de la canne à sucre. *AGRICULTURE ET DEVELOPPEMENT*, 24, 4-8
- Girard, M.C., & Girard, C.M. (1999). *Traitements des données de télédétection. Technique et ingénierie - Série Environnement*
- Gitelson, A.A., Gritz, Y., & Merzlyak, M.N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Plant Physiology*, 160, 271-282
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., & Merzlyak, M.N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58, 289-298
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., & Rundquista, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 76-87

- Gitelson, A.A., Vina, A., Ciganda, V., Rundquist, D.C., & Arkebauer, T.J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32, 1-4
- Goldman, D.B., & Chen, J.H. (2005). Vignette and Exposure Calibration and Compensation. In *11th IEEE International Conference on Computer Vision*, Beijing (China), October, 899-906
- Green, S.R., Kirham, M.B., & B.E., C. (2006). Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management*, 86, 165-176
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., & Strachan, I.B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352
- Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81, 416-426
- Hainzelin, E. (1999). La canne à sucre et l'eau. *AGRICULTURE ET DEVELOPPEMENT*, 24, 3-146
- Hare, E.W., Miller, J.R., & Edwards, G.R. (1984). Studies of the vegetation red reflectance edge in geobotanical remote sensing. In *9th Canadian Symposium of Remote Sensing*, Ottawa (ON), 13-17 August
- Hinzman, L.D., Bauer, M.E., & Daughtry, C. (1986). Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 19, 47-61
- Horler, D.N.H., Dockray, M., & Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4, 273 - 288
- Hurney, A.P. (1984). Excess nitrogen is detrimental to crop yields.. *BSES Bull*, 8
- Idso, S.B. (1982). Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59-70
- Idso, S.B., & Baker, D.G. (1967). Relative importance of reradiation, convection and transpiration in heat transfer from plants. *Plant Physiology*, 42, 631-640
- Idso, S.B., Jackson, R.D., & Pinter, P.J. (1977). Remote sensing of crop yields. *Science*, 196, 19-25
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., & Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55
- Ingram, K.T., & Hilton, H.W. (1986). Nitrogen - potassium fertilization and soil moisture effects on growth and development of drip irrigated sugarcane. *Crop Science*, 26, 1034-1039
- Inoue, Y., & Penuelas, J. (2001). An AOTF-based hyperspectral imaging system for field use in ecophysiological and agricultural applications. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 3883-3888
- INSEE (2002). Canne à sucre, état des lieux. In, *Economie de La Réunion* (p. 12)
- Jackson, R.D. (1982). Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation*, 1, 43 - 85

- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., & Pinter, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 17, 1133-1138
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., & Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Research*, 13, 651-656
- Jacob, F., Petitcolin, F., Schmugge, T., Vermote, E., French, A., & Ogawa, K. (2004). Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors. *Remote Sensing of Environment*, 90, 137-152
- Jones, H.G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plan-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2427-2436
- Jones, H.G., Aikman, D., & McBurney, T.A. (1997). Improvements to infra-red thermometry for irrigation scheduling in humid climates. In *ISHS Acta Horticulturae 449 : 2nd International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*, 259-265
- Jordan, C.F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666
- Kimball, B.A., LaMorte, K.L., Pinter Jr, P.J., Wall, G.W., Hunsaker, D.J., Adamsen, F.J., Leavitt, S.W., Thompson, T.L., Matthias, A.D., & Brooks, T.J. (1999). Free-air CO₂ enrichment (FACE) and soil nitrogen effects on energy balance and evapotranspiration of wheat. *Water Resource Research*, 35, 1179-1190
- Labbé, S., Roux, B., Lebourgeois, V., & Bégué, A. (2007). An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras: spectral characterization and acquisition guidelines. In *ISPRS workshop - Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems*, Newcastle (ENGLAND), 11-14 Sept
- Langellier, P. (1990). Etude de la variabilité multilocale de la croissance de la canne à sucre à La Réunion. In, *IRAT* (p. 15), Réunion
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Mallavan, B., Prévot, L., & Roux, B. (2008a). Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test. *Sensors*, 8, 7300-7322
- Lebourgeois, V., Labbé, S., Bégué, A., & Jacob, F. (2008b). Atmospheric corrections of low altitude thermal airborne images acquired over a tropical cropped area. In *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, Boston, Massachusetts (USA), 6 - 11 July
- Lejars, C., & Siegmund, B. (2004). Overview of Réunion sugar industry. In *Annual Congress Of The South African Sugar Technologists' Association (SASTA)*, Mount Edgecombe (SA), 29-37
- Martin, J.P. (1934). Symptoms of malnutrition manifested by the sugar cane plant when grown in culture solutions from which certain essential elements are omitted. *Haw. Plant. Rec.*, 39, 3-30

- Martiné, J. (1997). Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à La Réunion : utilisation du modèle de croissance Mosicas. Actes du 4ème congrès international de l'Artas, octobre 1997, La Réunion, 2ème rencontre Afcas, 353-365
- Martiné, J. (1997 et 1998). Rapports annuels CIRAD Réunion, filière canne à sucre : opération modélisation de la croissance de la canne à sucre. In, *CIRAD*, Réunion
- Martiné, J.F. (1999). Modélisation de la croissance de la canne à sucre, Rapport Annuel d'opération. In (p. 5): CIRAD-CA, Pôle Canne à Sucre, Réunion
- Martiné, J.F. (2004). Estimation of total surface of green leaves through simple in-situ measurements on sugarcane crop. In CIRAD (Ed.) (p. 4), Saint Denis de la Réunion
- Moran, M.S. (2000). Image-based remote sensing for agricultural management - Perspectives of image providers, research scientists and users. In *2nd International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*, Orlando, Florida (USA), 10-12 January, 23-30
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 46, 246-263
- Moran, M.S., Fitzgerald, G., Rango, A., Walthall, C., Barnes, E., Bausch, W., Clarke, T., Daughtry, C., Everitt, J., Escobar, D., Hatfield, J., Havstad, K., Jackson, T., Kitchen, N., Kustas, W., McGuire, M., Pinter Jr., P., Sudduth, K., Schepers, J., Schmugge, T., Starks, P.L., & Upchurch, D. (2003). Sensor development and radiometric correction for agricultural applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 705-718
- Moran, M.S., Inoue, Y., & Barnes, E.M. (1997). Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61, 319-346
- Nielsen, D.C. (1990). Scheduling irrigations for soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI). *Field Crops Research*, 23, 103-116
- Osborne, S.L., Schepers, J.S., Francis, D.D., & Schlemmer, M.R. (2002). Use of Spectral Radiance to Estimate In-Season Biomass and Grain Yield in Nitrogen- and Water-Stressed Corn. *Crop Science*, 42, 165-171
- Penuelas, J., Baret, F., & Filella, I. (1995a). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll *a* ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31, 221-230
- Penuelas, J., Filella, I., Lloret, P., Munoz, F., & Vilajeliu (1995b). Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2727-2733
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., & Field, C.B. (1994). Reflectance Indices Associated with Physiological Changes in Nitrogen- and Water-Limited Sunflower Leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135-146

- Penuelas, J., Gamon, J.A., Griffin, K.L., & Field, C.B. (1993). Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 46, 110-118
- Pierrot-Desseilligny, M. (2008). Unpublished work - Cemagref, Montpellier (France). In, Montpellier (France): Cemagref
- Pinter Jr, P.J., Jackson, R.D., & Moran, M.S. (1990). Bidirectional reflectance factors of agricultural targets : A comparison of ground-, aircraft- and satellite-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 32, 215-228
- Pinter Jr., P., Hatfield, J., Schepers, J., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T., & Upchurch, D.R. (2003). Remote Sensing for Crop Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, 647–664
- Pinter Jr., P., Zipoli, G., Reginato, R.J., Jackson, R.D., Idso, S.B., & Hohman, J.P. (1990). Canopy temperature as an indicator of differential water use and yield performance among wheat cultivars. *Agricultural Water Management*, 18, 35-48
- Pouzet, D., Chabalier, P.F., & Velle, A. (2007). Diagnostic de nutrition azotée au champ de la canne à sucre par mesure photométrique au chlorophylle-mètre (spad). In (p. 15 p.), Saint Denis (La Réunion): CIRAD
- Prost, L., & Jeuffroy, M.H. (2007). Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. *Agronomy for Sustainable Development*, 27, DOI: 10.1051/agro:2007032
- Robertson, M.J., Muchow, R.C., & Wood, A.W. (1999). A physiological basis for response of sugarcane to drying-off before harvest. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, 21, 196-202
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In *3rd ERTS Symposium*, 309-317
- Rudorff, B.F.T., & Batista, G.T. (1990). Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological–spectral models. *Remote Sensing of Environment*, 33, 183-192
- Samuels, G. (1965a). The response of sugarcane to fertilizer application as influenced by irrigation. In *International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Puerto Rico, 222-226
- Samuels, G. (1965b). The response of sugarcane to fertilizer application as influenced by irrigation. *Proc. 12th Congress ISSCT*, Puerto Rico, 222-226
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213-224
- Schott, J.R., Barsi, J.A., Nordgren, B.L., Raqueno, N.G., & De Alwis, D. (2001). Calibration of Landsat thermal data and application to water resource studies. *Remote Sensing of Environment*, 78, 108-117

- Sellers, P.J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 855-867
- Serrano, L., Filella, I., & Penuelas, J. (2000). Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, 40, 723-731
- Simoes, M.S., Rocha, J.V., & Lamparelli, R.A.C. (2005). Growth indices and productivity in sugarcane. *Scientia Agricola*, 62, 23-30
- Simoneau, P., Berton, R., Caillault, K., Durand, G., Huet, L., Labarre, C., Malherbe, C., Miesh, C., Roblin, A., & Rosier, B. (2001). MATISSE, Advanced Earth Modeling for Imaging and Scene Simulation. In *ESO/SPIE Europto European Symposium on Remote Sensing*, Toulouse (FR), 17-21 September, 10
- Smit, M.A., & Singels, A. (2006). The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Res.*, 98, 91-97
- Sripada, R.P., Heiniger, R.W., White, J.G., & Meijer, A.D. (2006). Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-Season Nitrogen Requirements in Corn. *Agronomy Journal*, 98, 968-977
- Stevensen, D.W.A., Van der Merwe, A., Benninga, W., & Allison, J.C.S. (1992). Response of different sugarcane varieties to greater than normal applications of nitrogen. *Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc.*, 50-53
- Sugiura, R., Noguchi, N., & Ishii, K. (2007). Correction of low-altitude thermal images applied to estimating soil water status. *Biosystems Engineering*, 96, 301-313
- Taner, C.B. (1963). Plant Temperature. *Agronomy Journal*, 55, 210-211
- Tardieu, F., & Dreyer, E. (1997). Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. In INRA-Éditions (Ed.), *L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau* (pp. 41-59): Institut National de la Recherche Agronomique
- Thomas, J.R., & Gausman, H.W. (1977). Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. *Agronomy Journal*, 69, 799-802
- Van Dillewijn, C. (1960). *Botanique de la canne à sucre*: Wageningen Hollande Ed.
- Wiedenfied, R.P. (1995). Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. *Field Crops Research*, 43, 101-108
- Wood, R.A. (1990). The roles of nitrogen, phosphorus and potassium in the production of sugarcane in South Africa. *Fertilizer Res.*, 26, 89-98

Articles

Article 1 – Page 83

Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Mallavan, B., Prévot, L., Roux, B., 2008. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. "Sensors", 8(11), 7300-7322; doi:10.3390/s8117300.

Article 2 – Page 107

Lebourgeois, V., Labbé, S., Jacob, F., Bégué, A., 2008. Atmospheric corrections of low altitude thermal infrared airborne images acquired over a tropical cropped area. In "Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium", Boston (USA), 6-11 July 2008, (III) 672-675.

Article 3 – Page 112

Lebourgeois, V., Bégué, A., Letourmy, P., Martiné, J.F., Houlès, M. Sugarcane crop status diagnosis using airborne-based imaging system in cases of combined water and nitrogen stress. Soumission en avril 2009 à "Field Crop Research".

Article 4 – Page 138

Lebourgeois, V., Chopart, J.L., Bégué, A., Le Mezo, L. Towards the combined use of a thermal infrared water stress index and water balance modelling for irrigation monitoring on sugarcane crop. Soumis en février 2009 à "Agricultural Water Management".

ARTICLE 1

Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test

"Sensors"

8(11), 7300-7322; doi:[10.3390/s8117300](https://doi.org/10.3390/s8117300)

Article

Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test

Valentine Lebourgeois ^{1,*}, Agnès Bégue ², Sylvain Labbé ³, Benjamin Mallavan ²,
Laurent Prévot ⁴ and Bruno Roux ⁵

¹ CIRAD UPR SCA, Station La Bretagne, Saint-Denis, La Réunion, F-97408 France

² CIRAD UMR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, F-34093 France;

E-Mails: agnes.begue@cirad.fr; benjamin.mallavan@teledetection.fr

³ Cemagref UMR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, F-34093 France;

E-Mail: sylvain.labbe@cemagref.fr

⁴ INRA UMR LISAH, SupAgro, Montpellier, F-34060 France;

E-Mail: laurent.prevot@supagro.inra.fr

⁵ Avion Jaune, Minéa Incubation, Montpellier, F-34196 France; E-Mail: bruno.roux@lavionjaune.fr

* Author to whom correspondence should be addressed; Tel.: +33-4-67-54-87-44;

Fax: +33-4-67-54-87-00; E-Mail: valentine.lebourgeois@cirad.fr

Received: 7 October 2008; in revised form: 30 October 2008 / Accepted: 14 November 2008 /

Published: 17 November 2008

Abstract: The use of consumer digital cameras or webcams to characterize and monitor different features has become prevalent in various domains, especially in environmental applications. Despite some promising results, such digital camera systems generally suffer from signal aberrations due to the on-board image processing systems and thus offer limited quantitative data acquisition capability. The objective of this study was to test a series of radiometric corrections having the potential to reduce radiometric distortions linked to camera optics and environmental conditions, and to quantify the effects of these corrections on our ability to monitor crop variables. In 2007, we conducted a five-month experiment on sugarcane trial plots using original RGB and modified RGB (Red-Edge and NIR) cameras fitted onto a light aircraft. The camera settings were kept unchanged throughout the acquisition period and the images were recorded in JPEG and RAW formats. These images were corrected to eliminate the vignetting effect, and normalized

between acquisition dates. Our results suggest that 1) the use of unprocessed image data did not improve the results of image analyses; 2) vignetting had a significant effect, especially for the modified camera, and 3) normalized vegetation indices calculated with vignetting-corrected images were sufficient to correct for scene illumination conditions. These results are discussed in the light of the experimental protocol and recommendations are made for the use of these versatile systems for quantitative remote sensing of terrestrial surfaces.

Keywords: Digital camera; spectral sensitivity; vignetting; radiometric correction; crop monitoring; airborne images.

1. Introduction

Recent developments in sensor technologies have made consumer digital cameras more and more efficient and affordable. The main advantage of digital photography lies in simplified image processing. The use of digital cameras or webcams has appeared across multiple different domains, including colorimetric applications [1-3] and environmental applications by characterizing and monitoring features [4-5]. Agricultural applications benefit significantly from the use of digital cameras in plant phenology monitoring [6-8], precision farming [8-10], production assessment [9, 11-12], and vegetation structure characterization using hemispherical lenses [13-14]. Digital cameras can be used either in a stationary installation [6-7] or onboard a light aircraft or unmanned aerial vehicle, a deployment which is made possible thanks to their low weight [15-16]. In most cases, the digital photographs are recorded in JPEG or TIFF formats, and the Red, Green and Blue (RGB) channels are obtained through simple image processing. The RGB channels are then either used for image classification, or combined in spectral indices to be correlated with the surface parameters of interest. Despite a number of interesting results, these digital camera systems generally suffer from signal distortions due to the on-board image processing algorithms, and they offer limited quantitative data acquisition capabilities.

Several factors affect the signal, and the conversion between object luminance and digital image measurement is not straightforward (Figure 1). These factors are camera-related (color processing algorithms, camera settings and vignetting) and environment-dependent (sun geometry, atmosphere and flight altitude). Although researchers have paid significant attention to image geometry [17], to date much less attention has been paid to the relation between pixel values and target radiance [14]. In certain cases, like time series analysis or quantification of surface parameters, pixel radiometry must be corrected in order to be comparable across time and space. The main sources of radiometric distortions are:

Gamma correction: Digital cameras are based on CCD (charge-coupled device) or CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) detectors that are linear photoconductive devices. If twice the flux of photons is received on a given pixel, twice the output value will be generated. Despite the intrinsic linearity of these sensors, digital value output from standard digital images is not a linear

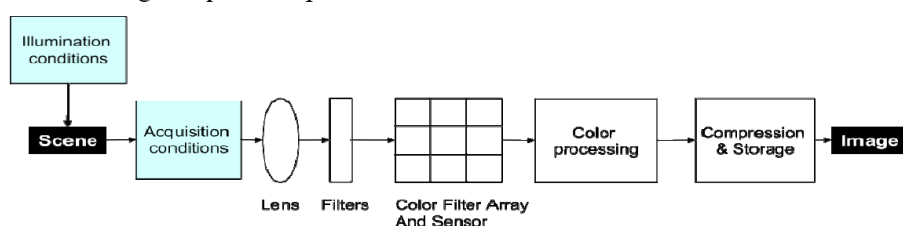
measure of object brightness, since the image processing software embedded in digital cameras is designed to emulate the non-linear behavior of the human eye. Accordingly, most modern consumer cameras use some type of gamma adjustment to map the image to the available quantization range in order to improve esthetics [18].

CFA interpolation (or demosaicing): Most of the digital cameras use a single sensor with a color filter array (CFA) that permits only one color to be measured at each pixel (Red, Blue or Green, sometimes Cyan). To create the color image, the missing color values are estimated for each pixel by means of CFA interpolation. The color interpolation process, also known as demosaicing, is generally achieved using a proprietary algorithm.

Vignetting: This distortion refers to the phenomenon of brightness attenuation away from the image center, and is an artifact that is prevalent in digital photography. Several mechanisms may be responsible for vignetting effects. Some arise from the optical properties of camera lenses, the most prominent of which is off-axis illumination falloff or the \cos^4 law. Other sources of vignetting are geometric in nature, including the light arriving at oblique angles to the optical axis and subsequently being partially obstructed by the field stop or lens rim [19]. Although lens manufacturers attempt to design their lenses so as to minimize the effects of vignetting, it is still present to some degrees in all lenses. Vignetting presents problems in measurement applications when radiometric quantities are estimated from images [20].

Radiometric normalization between images: The camera measures radiance, the energy reflected by the scene. This radiance depends on the incident radiation at the time the image was acquired, and on the optical properties of the scene (Figure 1). The quantity and quality (spectral composition) of the incident radiation is related to the solar zenith angle and to atmospheric conditions. The radiance is converted into Digital Numbers (DN) depending on the camera settings (the lens f-stop, the exposure time, and the gain via the ISO setting). To compare images, one must take into account both the incident radiation and the camera settings.

Figure 1. Environment-dependent (blue boxes) and camera-related (white boxes) factors involved in the image acquisition process.



We observed that many factors play a role in image acquisition: built-in gamma correction and image interpolation, vignetting, camera settings, and quality and quantity of incoming radiation conditions. The printing industry and medical communities have investigated the properties of consumer digital cameras as colorimetric measurement device [3, 21, 22]. However, few studies have investigated the utility of this type of camera as a multispectral radiometer, especially for out-door measurements. The objective of this paper was to test simple radiometric corrections of the aforementioned camera-related distortions and environmental conditions, and to quantify the

corrections in terms of ability to better monitor vegetation variables. Our algorithm employed three steps: 1) correction of the camera-related factors, 2) correction of the environment-dependant factors and 3) quantification of the signal correction in terms of vegetation variables monitoring.

To achieve this, in 2007 we conducted a five-month experiment in which we flew over sugarcane trial plots using original RGB and modified RGB (Red-Edge and NIR) cameras loaded onto an ultralight aircraft. Our hypothesis was that if accurate radiometric data could be derived from the images using simple post-processing, we could design a cost-effective imaging system that could lead to exciting possibilities for new approaches in precision farming.

2. Data acquisition

Our radiometric data acquisition system consisted of an ultralight aircraft equipped with modified digital cameras that acquired and measured the sunlight reflected in five different spectral bands. Between May and September 2007, seven airborne flight trials were conducted over a 7.3 ha experimental sugarcane field on Reunion Island, a French territory that lies in the Indian Ocean.

2.1. Digital cameras

We used three Canon® EOS 400D digital cameras (10.1 Megapixel CMOS sensor); each of which had a focal length of 35 mm. The spectral sensitivity of the three cameras was measured in the laboratory with a monochromatic source 1.2 nm wide [23–24]. The original camera measured radiation in Red, Green and Blue spectral bands (Figure 2a), and is hereafter referred to as the RGB camera. The other two cameras were modified to allow them to detect radiation in additional spectral bands (Figure 2b). The modification consisted of removing the original internal NIR high-pass filter (Figure 2a) and adding specific band-pass filters [8, 15]. One camera was then equipped with an external band-pass Oriel filter (690–709 nm 50% cut), and the other with a LDP LLC XNiteBPG filter (808–855 nm 50% cut); these cameras are hereafter referred to as the RDG (Red-edge) and the NIR (Near Infrared) cameras. Figure 2b shows that the wavebands are broad for the RGB camera, and especially narrow for the RDG camera. If we consider the standard spectral profile of a green vegetation canopy, our results also indicate that the RDG is located at the beginning of the slope between the red and near infrared spectral domains.

Figure 2. Normalized spectral sensitivity of CANON EOS 400D cameras: **(a)** the original (RGB) and modified (without NIR filter), **(b)** the original (RGB) and modified (RDG and NIR). The colours of the lines correspond to the camera channels. The grey line is a standard reflectance profile of a green vegetation canopy.

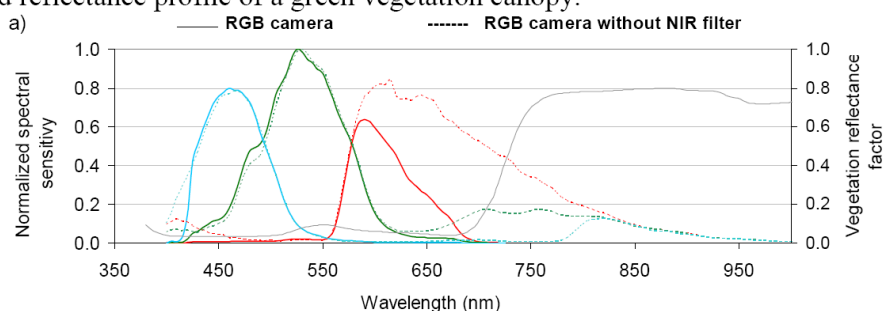


Figure 2. Cont.

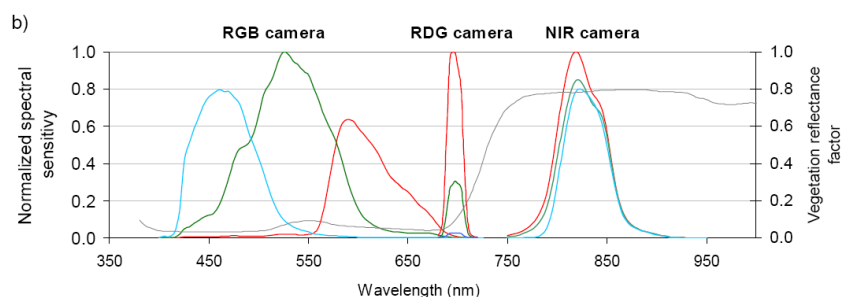


Table 1. CANON EOS 400D camera settings.

Camera	Shutter speed	Sensitivity	Aperture [*]
RGB	1/640	100	f-5
RDG	1/160	200	f-5
NIR	1/1000	200	f-5

^{*} f-numbers = diameter of the entrance pupil / effective focal length of the lens

The camera focus was set to infinite. The settings of the three cameras (aperture, shutter speed, and sensitivity, Table 1) were determined by flight acquisition tests, and were adjusted manually to eliminate saturated values in any band. The settings were kept unchanged throughout the experiment.

2.2. Airborne image acquisition

The three multispectral cameras (2.8 kg) were assembled and mounted on board an ultralight aircraft [24]. The cameras were pointed in the same direction (vertical viewing). Their shutters were synchronized to a single trigger. The ultralight aircraft has a slow flight speed (apparent ground speed between 50 km/h and 70 km/h, depending on wind conditions) that does not result in motion blur when images are taken at a low altitude (600 m). The position of the aircraft was recorded by a GPS data unit during each flight.

Seven flights were undertaken over the La Mare site between May and September 2007: May 2, May 25, June 8, June 29, July 23, August 13, and September 5. The flights were performed between 11:00 am and 12:00 noon solar time, on clear days. The aircraft flew transects over the field at about 600 m altitude, producing images with a ground resolution of between 10 and 12 cm.

During the same period, additional airborne acquisitions were taken from other agricultural regions of the island at different altitudes (between 300 m and 1,500 m), leading to a total of about 500 photographic images per camera acquired under similar atmospheric conditions (clear days) and irradiance geometric parameters (around 12:00 solar hour).

All the images were recorded in JPEG and RAW (termed CR2 for CANON cameras) formats.

2.3. The ground experiment

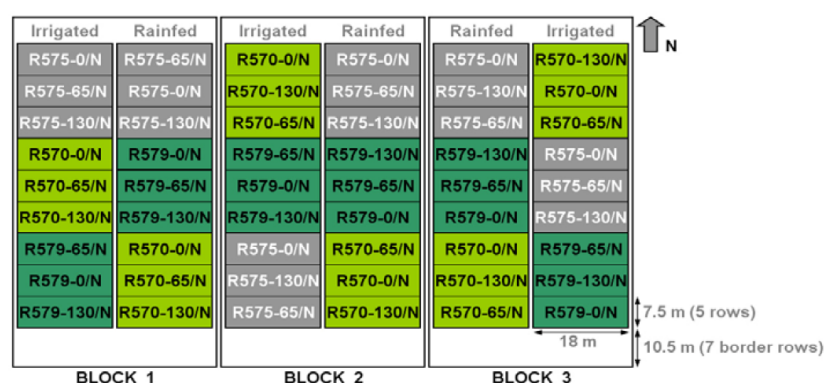
The sugarcane experimental field is located in La Mare, Sainte Marie (Lat 20.9°S; Lon 55.5°E), in the northern part of Reunion Island (average altitude of 60 m). The field was divided into three randomised blocks cultivated with three cultivars of sugarcane (R570, R575, R579) under three different nitrogen inputs (0/N, 65/N, 130/N) and two water treatments (irrigated and rainfed) (Figure 3). For each combination of treatments (cultivar, nitrogen, irrigation), the size of the plot in each block was 135 m². Each comprised 5 rows 18 m in length, with a 1.5 m inter-row separation.

The sugarcane field was in its seventh month of growth at the beginning of the experiment in May, and exhibited a closed canopy at that time. Plant measurements were performed monthly on the R570 and R575 cultivar plots, including Leaf Area Index (LAI) and leaf greenness (SPAD, SPAD-502 MINOLTA). Values of LAI and SPAD were obtained using non-destructive measurements on the three central rows of each plot in order to avoid border effects, and were averaged for each plot [25]. An integrated index, the canopy chlorophyll content CC, was estimated from the following equation:

$$CC = SPAD * LAI \quad (1)$$

The CC index is linked to NDVI [26, 27]. The mean annual precipitation in the study area was 1514 mm/year, but the experiment took place during the dry season (alternating dry and wet periods).

Figure 3. Layout of the La Mare 2007 experimental trials: irrigated/rainfed, three sugarcane cultivars (R570, R575, R579), and three nutrient inputs (0N, 65N, 130N), three replications each.



3. Data processing

The data processing steps aimed to recover comparable values of crop variables across both space and time. The sources of radiometric distortions in the measurements, derived both from the camera itself and from the acquisition conditions, were listed in the introduction. The radiometric correction process implemented in this study included the following stages:

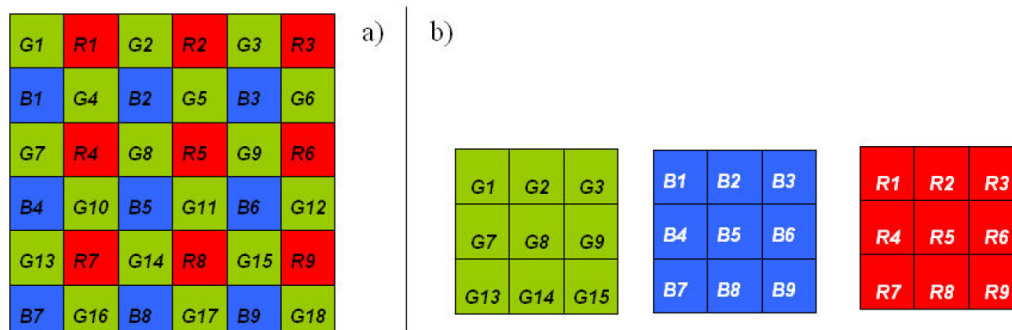
- Decoding unprocessed digital photo;
- Correcting the vignetting;
- Normalizing the image series over time.

We then calculated the relationship between image spectral values and ground measurements.

3.1. Decoding unprocessed digital photos

The CANON cameras produce their images by means of a Bayer matrix (or Bayer CFA) whereby each individual pixel is filtered and coded as red (R), green (G) or blue (B) (Figure 4). As explained in the introduction, for most commercial cameras, a “black box” proprietary interpolation algorithm is applied to the Bayer matrix to calculate a full frame RGB image which simulates a realistic appearance for the human eye. The image radiometric resolution is often lowered during this operation (generally from 12 to 8 bits) and compressed (using JPEG format). In order to preserve the information contained in the image, we worked with the unprocessed CMOS data files (CR2 format for CANON cameras). To decode these unprocessed images, for which the camera manufacturer does not always provide decoding software, we used IRIS 5.5, a free software package available on the web (Buil C., personal communication; <http://www.astrosurf.com/buil/iris/iris.htm>). This software is based on a portable open source program, *dcraw* (Coffin D., personal communication; <http://www.cybercom.net/~dcoffin/dcraw/>) which supports most RAW formats and is available on most operating systems. IRIS splits the CR2 files into four monospectral images, each corresponding to a spectral band (G, G, R, B). The resulting output images (1,953 x 1,301 pixels) are four times smaller than the originals. [13] who also used the *dcraw* program, demonstrated perfect linearity between the DN of decoded images and quantum sensor measurements.

Figure 4. (a) Color Frame Array of the Canon EOS 400D and (b) extraction of “spectrally pure” images.



For the RGB camera, we kept the Red image, one of the two Green images, and the Blue image. Only the Red image extracted from the CFA was stored for the RDG and NIR cameras, as the Red band has the best signal to noise ratio (Figure 2b). This process resulted in five spectral bands (Red, Green, Blue, Red-Edge, NIR) for each shot.

The difference between the unprocessed images and JPEG images was studied by comparing their respective DN values. Because of the intrinsic nature of the JPEG and unprocessed formats, and the difference in image size (JPEG: 3,888 x 2,592 pixels - RAW: 3,906 x 2,602 pixels), it was not possible to compare the images on a pixel-by-pixel basis. Consequently, we made the comparison on a set of training polygons representing a large range of radiometric values: dark road, bright flat roofs, dense vegetation, ...etc. The polygons were selected in homogeneous areas to limit location uncertainty. The test was done on the three spectral bands (Red, Green, NIR) of an image acquired on June 29.

3.2. Vignetting correction

The correction of the image vignetting was performed using three steps: preparation of the data set, calculation of the radiometric distortion by model fitting, and the correction itself. The calculations were made separately for each spectral band.

To determine the vignetting effects in an image, the most straightforward approach involves capturing an image that spans a uniform scene region, such that brightness variations can be attributed solely to vignetting [28]. However, obtaining suitable imaging conditions for this approach can be challenging, and measurements are valid only for images captured by a single camera using identical settings [19]. We thus chose to calculate for each spectral band an average image from the 500 images acquired during the whole experiment over all different sites and at different altitudes. In order to avoid radiometric artifacts, we thresholded the DN values so as not to include pixels with a very high signal (buildings for example). Specific thresholds were applied to each spectral band. We ultimately subtracted from the mean image the dark current (DN = 255) added by the IRIS software during the decoding step. The resulting five mean images (Red, Green, Blue, Red-Edge, NIR) were then assumed to be directly proportional to luminance and were used to calculate and model the 2D radiometric profiles.

Most methods for vignetting correction use a parametric model to simplify estimation and minimize the influence of image noise [19]. Empirical models such as polynomial functions and hyperbolic cosine functions are typically used. We chose to fit the radiometric profile by using least square mapping to a bidimensional polynomial, resulting in a smoothed approximation of the vignetting effect. On our mean images, we tested different polynomial orders, from 2 to 7, to fit the optical deformation. Ultimately this polynomial function was used to create a filter mask that was applied (in a multiplicative way) to each image in order to eliminate vignetting.

Assuming that illumination conditions could cause vignetting-like effects (for instance “hot spot” effects) this process was initially performed separately for each date. In our experiment, this approach did not improve correction results (results not shown), so we chose to average a larger number of images that covered all dates in our study (about 500 images) to derive the vignetting profile.

3.3. Radiometric normalization

Radiometric normalization consists of rendering images acquired under different irradiance conditions and with different cameras that are comparable in terms of DN. By normalization, we mean here that neither absolute calibration coefficient nor incident radiation measurement was available.

The simplest and most common normalization method involves calculating normalized brightness for the RGB channels. This is performed for each image by dividing the brightness value for each of these channels by the total brightness of the image [6-7]. This method is satisfactory because it succeeds for acquisitions made with different irradiance and camera settings. However, despite its effectiveness, residual variations can be attributed to differences in the spectral distribution of incident solar radiation which are linked to the fraction of diffuse radiation in the total incident light [7]. The same advantages and limitations play a role when a spectral vegetation index is calculated [6-9]. Another empirical method, often used with satellite images, consists of using invariant dark and bright

points in the image [29-30]. These points can either be invariant scene features like roads, parking areas or buildings [15], or experimental targets like colored panels.

We tested two methods of radiometric normalization: normalization with invariant targets, and normalization using the cosine of the solar zenith angle:

- Six invariant targets were selected by photo-interpretation (three types of soil, a road, a bush and a building). Polygons were used to extract the DN in the five bands across all the images from the time series. Subsequently, we chose the June 29th image as our reference for the normalization process. For each spectral band, we calculated a transfer function between the DN of the invariant targets on the reference image and the other dates.
- In the absence of a global radiation measurement, we approximated the global radiation from the cosine of the sun's zenith angle (between 28.6° and 45.5° during the experiment). This method was possible only because the settings of the cameras did not change during our study.

The invariant and cosine normalization methods were validated using four plastic panels ranging in color from white to dark grey (1 x 1 m², about 4 x 4 pixels at 600 m flight altitude after image decoding). They were installed on the ground at each spectral acquisition date, close to the La Mare experimental field.

3.4. Relationship with surface parameters

To link the spectral and vegetation measurements, we first had to conduct some image post-processing: geometric correction, extraction of values related to the experimental plots, calculation of spectral indices, and ground data interpolation.

Referenced to a metric camera, the CANON camera lens distortion was measured as less than one pixel (Pierrot-Deseilligny M., 2008; personal communication), and so no correction was applied. For each set of images (RGB, RDG and NIR) acquired simultaneously using the trigger, we first co-registered the different bands to each other. We then performed a geometric correction on each date using a reference image chosen from the data set (June 29th).

The radiometric average value for each band was calculated at the plot scale. This calculation was made using the boundary map of the experimental field, after applying a negative buffer of two pixels in order to eliminate mixed border pixels and avoid possible errors due to the geometric correction.

From these mean values, and for each plot, we derived three normalized vegetation indices.

The Normalised Difference Vegetation Index (NDVI [31]):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (1)$$

The Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI [32]):

$$\text{GNDVI} = (\text{NIR} - \text{G}) / (\text{NIR} + \text{G}) \quad (2)$$

The Normalized Difference of the Green and Red bands (VIgreen [33]):

$$\text{VIgreen} = (\text{G} - \text{R}) / (\text{G} + \text{R}) \quad (3)$$

where NIR, R and G stand for DN in the Near-infrared, Red and Green bands respectively.

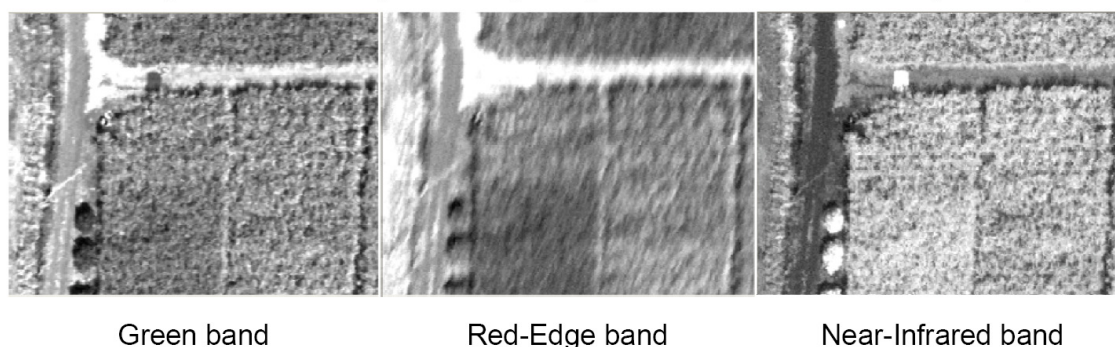
As plant measurements were not taken on the same dates as the airborne acquisitions, a linear interpolation between two ground measurement dates was applied in order to estimate LAI and SPAD values on the required image acquisition dates [25]. We then related the three vegetation indices to the CC (Chlorophyll Content) values and fitted regression functions using the entire data set.

4. Results

4.1. Airborne images

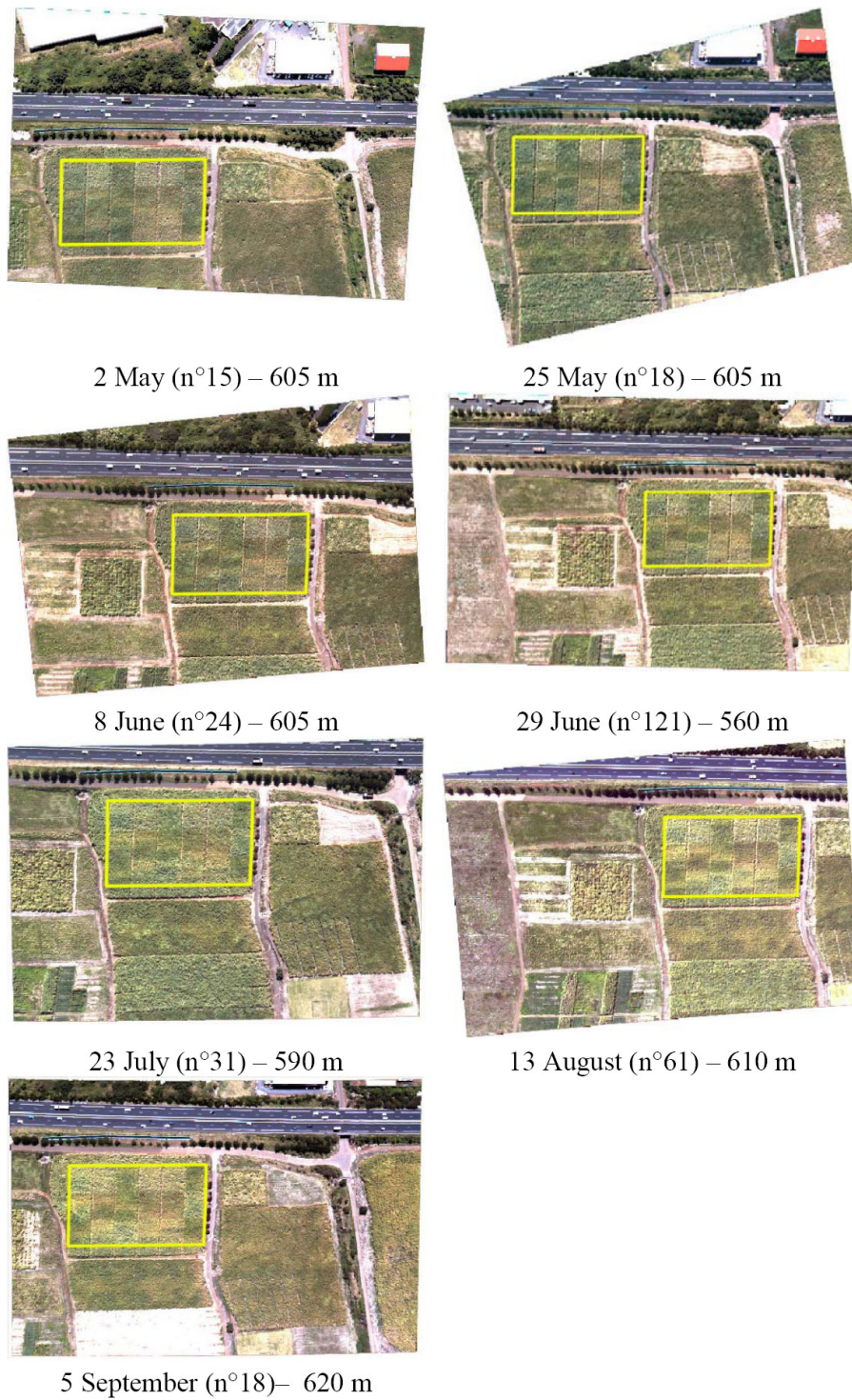
The images acquired from the ultra-light aircraft (ULA) were generally neat, with good contrast in the visible and NIR bands (Figure 5). The quality of the Red-Edge images was less satisfactory with a fuzzy rendering (motion blur) certainly due to the combined effects of exposure time and aircraft vibrations.

Figure 5. Subset of spectral images acquired with the three cameras (June 29).



The RGB image time series over the La Mare experimental site is shown in Figure 6. One can see that the sugarcane canopy is fully developed, and that the main change between the dates is in canopy color. The global yellowing of the canopy during the experiment is due to the senescence of the vegetation. Color variability within the experimental field (mosaic of experimental plots) is caused by the different cultivars, irrigation and nutrient treatments.

Figure 6. “La Mare” time series of visible images (BGR) taken at an aircraft altitude between 560 m and 620 m. The experimental field is identified by a yellow boundary.



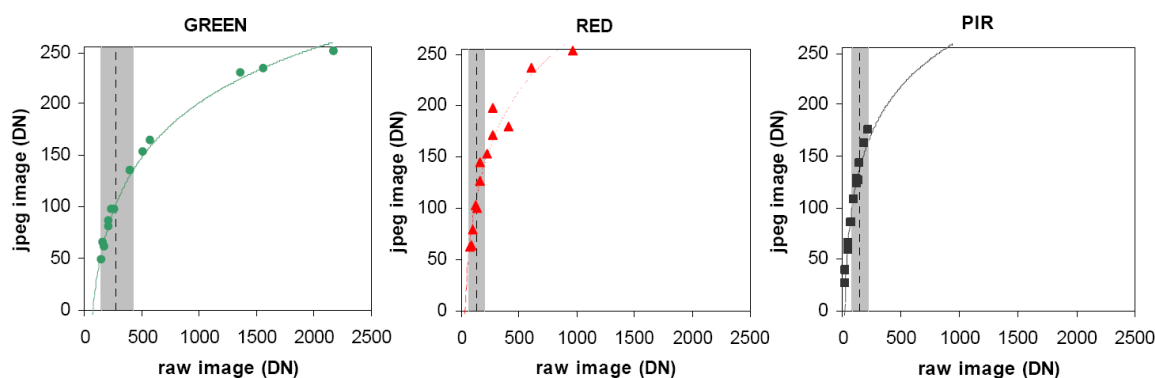
4.2. Radiometric corrections

Decoding the unprocessed digital photos

We compared the unprocessed (RAW) and JPEG images on a polygon basis. The relationships between the digital numbers from the unprocessed and JPEG versions of one image are shown in Figure 7 for both visible and NIR bands. First, one observes a difference in value depths (8-bits image for JPEG, 12-bits for unprocessed), except for the NIR unprocessed image which suffered from under-exposure. Secondly, the relation is not linear and the tonal mapping can be modelled with a logarithmic function.

As shown previously in Figure 2, the spectral response of vegetation is low in the visible bands and high in the NIR band. However, in our case the NIR images were underexposed and produced low DN values. This is confirmed by the low values of the mean DN measured on raw images obtained on La Mare sugarcane trial in the Green (276 ± 66), Red (131 ± 35), and NIR (153 ± 33) bands during the experiment. Thus, one can consider that the relation between Green, Red and PIR bands of RAW and JPEG images was linear for the range of radiometric values observed during crop monitoring (Figure 7).

Figure 7. Comparison of the digital numbers (DN) of an image in unprocessed (RAW) and JPEG formats. Logarithmic curves are drawn for each band. Dotted lines represent the mean raw DN measured on vegetation. Grey zones represent mean ± 2 standard-deviations.

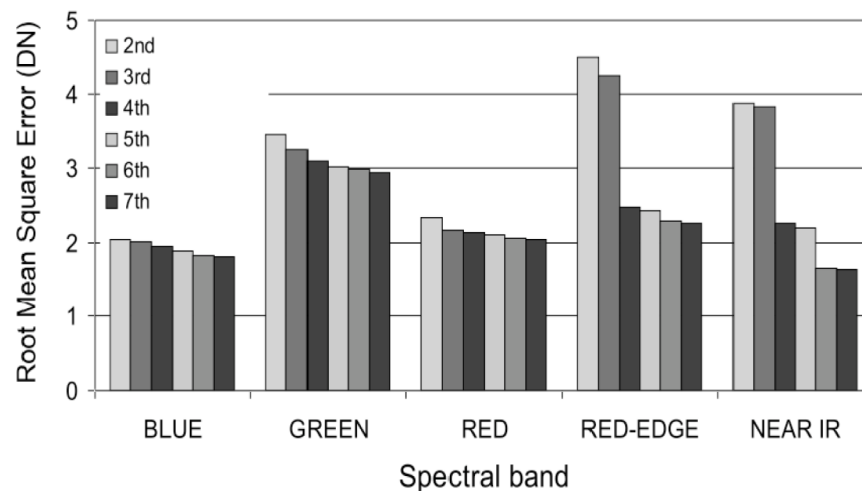


Vignetting correction

For each spectral band, we calculated a vignetting correction filter by fitting a polynomial function distribution onto an average image computed over the whole data set (about 500 images acquired in different locations and at different altitudes). This vignetting distribution function expresses the vignetting factor for a given position in the image as a polynomial function of position (i.e., row and column coordinates). Different degrees of polynomial were tested for each band and the resulting Root Mean Square Errors (RMSE) are as shown in Figure 8. In the visible (R, G, B) bands, an increase in the polynomial degree led to a small decrease in the RMSE. In the RDG and NIR, a significant decrease of the RMSE occurred between the 3rd and 4th degree. A second decrease between the 5th and

6th degree was observed for the NIR band; the 6th degree polynomial resulted in a good fit at the centre and corners of the image (Figure 9). These results led us to choose a 3rd polynomial degree function to correct the vignetting effects for the RGB, and a 4th and 6th polynomial degree function for the RDG and NIR, respectively.

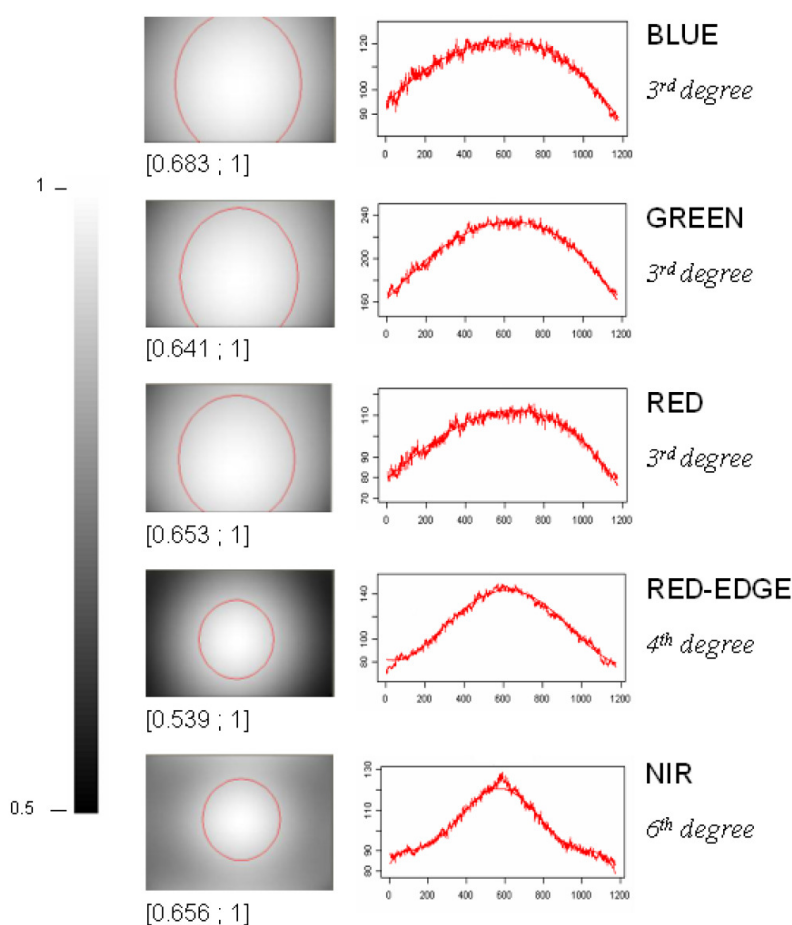
Figure 8. Effect of the polynomial degree of the vignetting function on the quality of the fitted model in each spectral band.



Once the optimal polynomial function had been found, we produced a vignetting filter image for each spectral band (Figure 9). Analysis of the filters indicated that the images taken with the RGB camera showed similar vignetting profiles, characterized by a smooth decrease in the signal (cosine-type function) as the distance from the centre increased. The signal attenuation was as high as 35% at the corners of the image. In the Red-Edge band the vignetting profile was somewhat sharper, and the loss reached 46% in the corners. The vignetting profile of the NIR images displayed a sharp shape, and attenuation of up to 35%. The shape of the vignetting profile seems more pronounced as the wavelength increases (from the visible to the NIR). Furthermore, in all bands the mask pattern was not symmetrical; recorded maxima were slightly shifted from the centre of the image.

The results obtained with the RGB camera indicate that today's commercial digital cameras are far from perfect, but are still of relatively good optical quality provided the borders of the photo are ignored. This is because vignetting effects are reduced during the manufacturing process. However, when the cameras are modified and equipped with an external pass-band filter, as in the case of the RDG and NIR cameras, the vignetting effects are substantial (large amplitude losses in the RDG, and a sharp profile shape in the NIR).

Figure 9. Vignetting filters for the Visible, RDG and NIR images (the circles are iso-contours for a signal loss of 10%), and the corresponding fitted diagonal profiles.

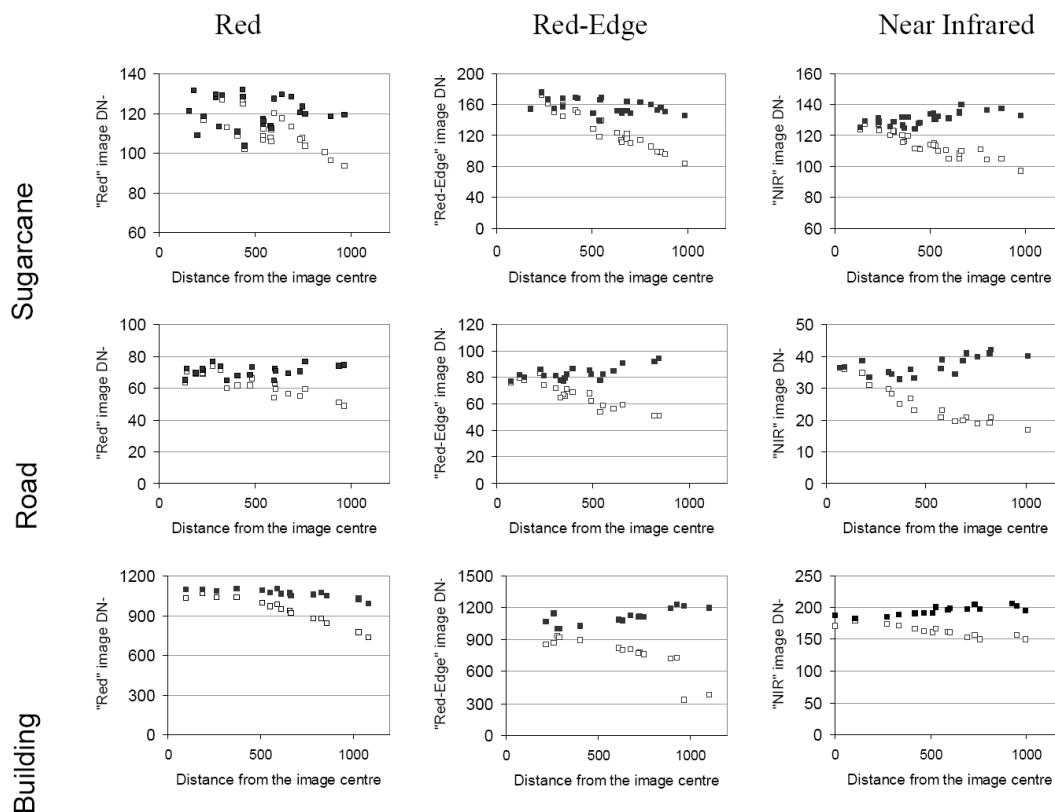


Effect of the vignetting correction on the radiometric stability of targets on one acquisition date

To isolate vignetting effects, we tested the correction on images taken under identical irradiance conditions (same date, around midday), but with changing object positions within the image (different distances from the centre resulting from different framing at different flight altitudes). The effect of the vignetting corrections on the DN of three targets (sugarcane, road, and building) with different spectral properties is shown in Figure 10 for the Red, Near Infrared and Red-Edge bands.

The vignetting effect was visible in all spectral bands and for the three targets, with progressively decreasing DN away from the image centre. The vignetting correction was generally appropriate, yielding a slight over-correction in the NIR. This over-correction does not seem to be linked to the nature of the target. The relative dispersion of the points in all spectral bands can be explained by different flight altitudes, which partly resulted in variable atmospheric noise in the signal. For the sugarcane target, the variability of points in the visible bands (Green and Blue not shown) can be explained by the effects of wind on the canopy (as observed on the images acquired at low altitude). Given these external effects, we consider the vignetting correction to be successful.

Figure 10. Effect of the vignetting correction on the DN values of three targets (open symbols = before correction; closed symbols = after correction), expressed in distance of the pixel to the centre of the image. The images were acquired on June 29, at different altitudes.



Effect of the radiometric normalization on the stability of invariant target DNs over time

We applied the cosine and invariant normalization methods on a time series of images acquired at 600 m altitude. The effects of these radiometric normalizations on the artificial targets' DNs are shown in Figure 11 for the five spectral bands. The invariant target correction reduced the variations significantly, from a range of variation of [15%-19%] for non-corrected DN, down to a range of variation of [9%-12%]. The cosine correction is globally equivalent to the invariant correction with a variation range of [9%-14%], and it exhibits a slight advantage in the Red and Near-Infrared bands.

When examining the invariant targets in the Red and NIR bands (Figure 12), we observed that bright objects are better corrected in the NIR using the invariant method, but this does not seem to be the case for darker targets. The red-edge radiometric correction is not satisfactory (not shown), presumably because of a location default of the target within the image due to poor image quality.

Overall, the cosine and invariant methods gave similar results. The advantage of the invariant method is to take into account atmospheric variations. The atmosphere is not a first order driving

factor in this case as the atmospheric conditions on the acquisition dates were similar (clear days); the first order driving factor is the solar zenith angle.

Figure 11. Comparison of different methods of radiometric normalization based on artificial invariant targets: no normalization, cosine and invariant methods. The mean coefficient of variation (CV) is the average of CV of the four artificial targets' digital numbers measured over the acquisition period.

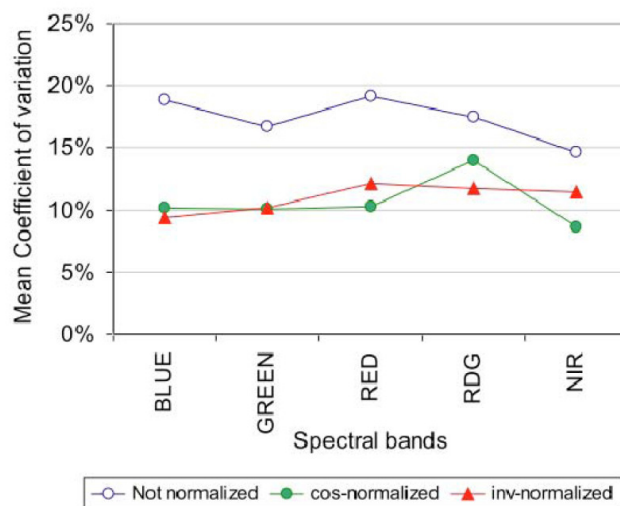
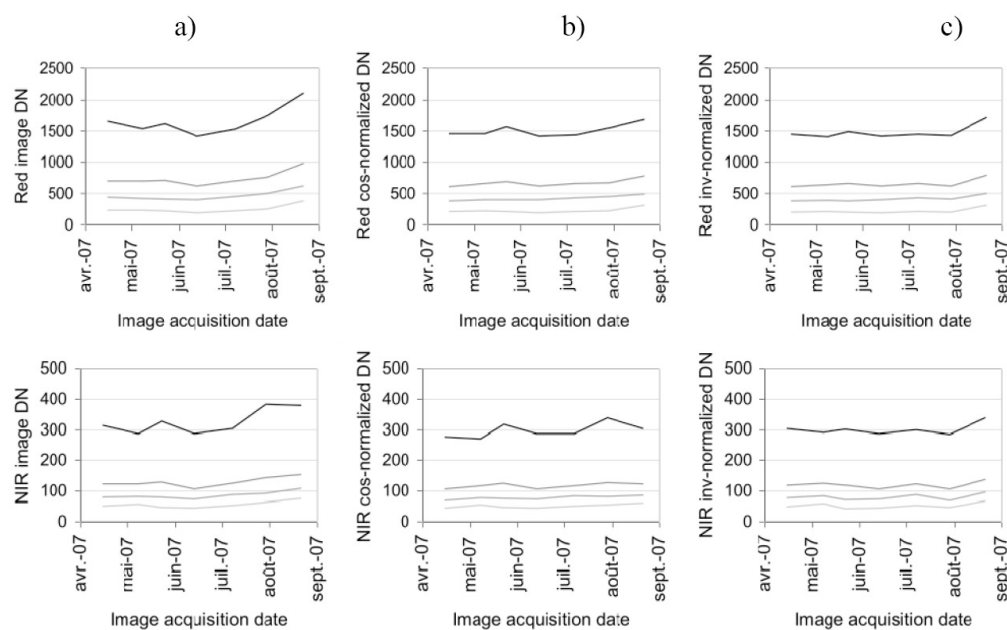


Figure 12. Radiometric values (DN) of artificial invariant target signals in the Red and Near Infrared bands. Comparison of (a) uncorrected values, (b) cosine-corrected values and (c) invariant-corrected values.



4.3. Effect of the radiometric correction level on the assessment of crop parameters

To assess the impact of the radiometric correction on vegetation monitoring, we tested the quality of regressions obtained between NDVI and chlorophyll content (CC). Figure 13 shows four regressions obtained with NDVI calculated for images that are corrected using four different levels of radiometric correction. The images were extracted from the temporal data set acquired over La Mare site in 2007 at 600 m altitude (Figure 6). The four levels of radiometric correction are:

- NDVI_jpg, calculated from the Red and NIR bands extracted from the JPEG images. The JPEG images are downloaded directly from the camera, and the spectral bands are split using image processing software.
- NDVI_raw, calculated from the spectral bands extracted from the decoded unprocessed images.
- NDVI_raw+dev, calculated from spectral bands extracted from the decoded unprocessed images, and corrected from the vignetting effect.
- NDVI_raw+dev+norm, calculated from spectral bands extracted from the decoded unprocessed images, corrected from the vignetting effect, and normalized over time using the invariant method.

As observed in other studies [26], the relationship between NDVI and CC was curvilinear due to NDVI saturation at high LAI values [34]. The point scattering is due to local soil condition variability, and plant measurement inaccuracy (essentially due to the destructive sampling method and the interpolation between dates). Despite the variability, the four regressions can be compared. The key conclusion is that there is no clear advantage between the use of NDVI_jpg, NDVI_raw and NDVI_raw+dev+norm ($r^2 = 0.65$, $r^2 = 0.63$, and $r^2 = 0.65$ respectively). Only the NDVI_raw+dev shows a better relationship with CC ($r^2 = 0.72$). We reached the same conclusions when NDVI was replaced by GNDVI (Figure 14), with a more significant effect of the vignetting correction ($r^2 = 0.71$ with NDVI_raw+dev, r^2 between 0.57 and 0.6 for other corrections). When NDVI is replaced by VIgreen (Figure 14), the correction levels were similar, with a slight superiority for the vignetting correction ($r^2 = 0.67$).

The absence of an effect from decoding unprocessed images can be explained by two factors. First, the DN values of the vegetation were low in the visible image (strong radiation was absorbed by the vegetation) and in the NIR (resulting from under-exposure of the camera). With DNs of below 200 (Figure 7), the vegetation pixel values were situated in the linear part of the gamma-type correction function embedded in the camera. Second, the DN values were calculated on a polygon basis and therefore the spatial interpolation of the JPEG images did not impact the mean radiometric value. For other types of target, with high radiometric values, our conclusions would be different, and a significant effect of RAW conversion correction would be expected.

In conclusion, the vignetting correction is the only correction that significantly improves the quality of the vegetation indices when a visible (red or green) and a Near Infrared band are used. When two visible bands are incorporated into a vegetation index (VIgreen for example), the vignetting correction is less pronounced. This is because the NIR and visible bands were derived from different cameras with different vignetting functions (Figure 9), while the Red and Green images were acquired using the same optics.

We were surprised to note that the normalization of the spectral bands prior to the calculation of the vegetation index reduced the quality of the relationship. Normalization is a difficult operation with various sources of errors (image registration error, photo-interpretation error, etc.). When individual bands (Red or NIR) are related to vegetation parameters, the relationships are improved by the normalization step (data not shown). In the case of vegetation indices, the radiometric errors of the individual bands are summed, resulting in a very variable result.

Figure 13. Fitted exponential functions between the Chlorophyll Content (LAI*SPAD) and NDVI for the 36 experimental plots across six dates. NDVI is calculated from the Red and NIR images at different levels of radiometric corrections (jpg = JPEG format; raw = unprocessed format; dev = vignetting-corrected; norm = normalized by invariant targets).

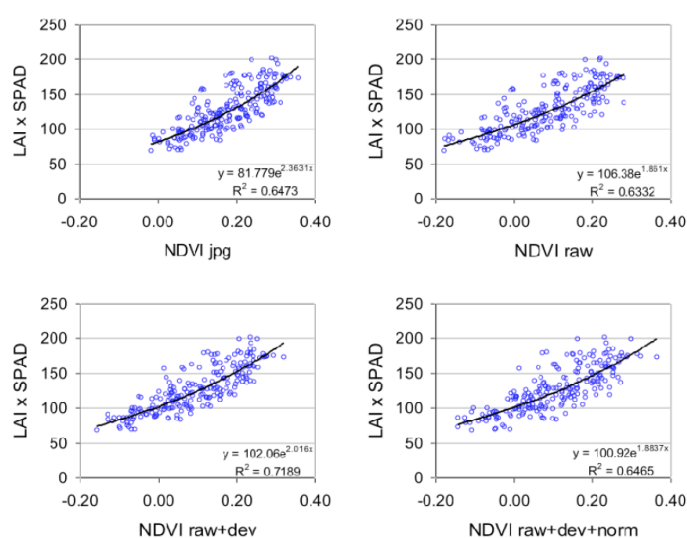
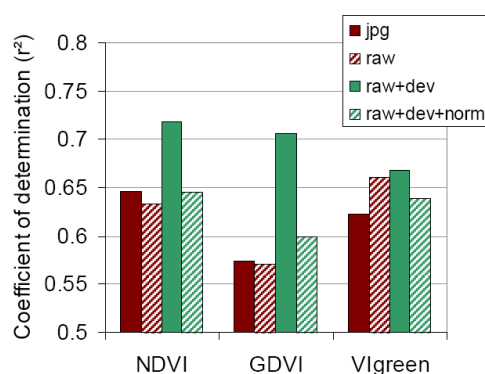


Figure 14. Coefficient of the regression functions between CC (LAI*SPAD) and three vegetation indices (36 experimental plots across six dates). VIs are calculated from the Red, Green and NIR images at different levels of radiometric correction (jpg = JPEG format; raw = unprocessed format; dev = vignetting-corrected; norm = normalized by invariant targets).



5. Discussion

In this paper, we tested a simple method of radiometric correction of a series of images acquired over time with three digital consumer cameras onboard a light aircraft. Two out of the three cameras were modified in order to measure radiation in bands other than the default RGB. The quality of the radiometric correction was evaluated against a ground data set of biophysical variables that were independently acquired from sugarcane trials on Reunion Island. The sources of radiometric distortions were both camera-related (image format and vignetting) and environment-dependent (incident radiation).

The modification of digital cameras to allow acquisition in the near infrared band is not new. In 2002, [35] infra-red images were captured using a filter over the camera lens to block energy in the visible bands, and by using the residual sensitivity of the silicon CCD array in near-infrared wavelengths. Today, modern digital cameras are equipped with an efficient infra-red blocking filter that has to be removed before blocking the visible band [8-15]. We showed in this paper that the use of an external band-pass filter allows us to acquire images in any spectral band from 400 nm to 900 nm. However, in that configuration, particular attention must be paid to the camera settings since the energy captured by the CMOS sensor is lower than in the unmodified camera (narrower band or reduced spectral sensitivity in the near-infrared). This leads to a requirement for longer exposure times with the result that data acquisition becomes susceptible to interference as a result of aircraft speed and vibration frequencies.

There are two reasons to use unprocessed images instead of JPEG or TIFF images: JPEG compression is lost and the DNs are not linear with the brightness of the scene. In our case, results show that the image format (JPEG versus unprocessed) has no effect on the correlation between a spectral band (or a vegetation index) and actual surface parameters. This is linked to our range of values for vegetation surface that lies in the linear region of the tone mapping algorithm; this is particularly true for the Near Infrared images that were under-exposed (Figure 7). We did not observe saturation and the JPEG signal was nearly proportional to the unprocessed signal. Furthermore, as we worked at the plot scale with averaged DN values of several pixels, the spatial interpolation due to the JPEG format, and the CFA interpolation, had no visible effect on the signal. However, these conclusions cannot be generalized and we strongly recommend using RAW images instead of JPEG or TIFF.

In respect of image vignetting, the effect was low on the vegetation indices that were calculated with visible bands only, but was high on the vegetation indices calculated with visible and infrared bands like the NDVI. To characterize and subsequently correct the vignetting effects, we developed an original method that is based only on the acquisition data set. Our method has the advantage that it remains usable even when the camera type is unknown or unavailable. However, our method does require a large series of different images with different acquisition and illumination scene conditions. Our results showed that: 1) vignetting is still present in modern RGB digital cameras, and it can be modelled with a second-degree polynomial function, 2) modification of the camera increases the vignetting observed on the images as quantified by [15], and 3) at minimum, a fourth-degree polynomial function is necessary for modelling the vignetting on modified cameras. This spectrally-

dependent distortion was responsible for the high sensitivity of the visible-infrared vegetation indices to vignetting.

Ultimately, the radiometric normalization between images still remains a problematic operation. Radiometric normalization using scene invariant targets and linear regression calculations for each spectral band has the advantage that it takes into account variations in incident radiation in each band (this is not the case when using spectral indices [7]). But the invariant method is also more time consuming because it involves additional image processing. Artificial targets generally suffer from insufficient size (often the size is no larger than five pixels) and logistical constraints. Natural targets are generally not invariant, except in the case of bare soil or buildings that are not representative of the vegetation spectral range that we are interested in. In our case, the radiometric normalization using invariant points increased the noise of the vegetation indices because the errors in the Red and Near Infrared bands were cumulative. When working with individual spectral bands, we recommend using the solar zenith angle correction. This simplified radiometric correction is valuable because acquisitions are generally conducted under clear sky and at around midday, and they therefore are captured under similar atmospheric conditions. Furthermore, this method can be used only if the camera settings are manually adjustable and remain unchanged during the experiment. In case of change in camera settings, [36] developed a calibration method for using digital cameras as luminance meters that is independent of exposure settings.

In any case, it is important to characterize the spectral and optical properties of the specific camera used [18]. As only one camera of a specific type has been tested, the conclusions drawn from our experiment are not necessarily valid for other CANON EOS400D cameras or for other camera types.

The next steps in our radiometric correction of time-based image series will be 1) to take into account the spectral variations in radiation due to atmospheric conditions, and 2) to correct for any directional effects [15].

6. Conclusions

The use of consumer digital cameras or webcams is increasingly prevalent in environmental applications. The acquisitions are generally performed with automatic settings and the images are saved in JPEG or TIFF formats. Under these conditions, image analysis can be qualitatively satisfying, but the accuracy of the image radiometry is generally too low to permit quantitative estimation of surface parameters.

We showed in this paper that, with a simple procedure, it is possible to increase the radiometric measurement capacity of images acquired by an ultralight aircraft. Putting together several known solutions for radiometric corrections (use of unprocessed images, vignetting correction and radiometric normalization), we showed that a comprehensive image processing workflow was possible for real-time crop monitoring using commercial digital cameras.

The use of modified cameras permits image acquisition in spectral bands that are not currently used in traditional photography, such as NIR, but that are important for accurate surface characterization. Using free software, we read the images in unprocessed camera output format to obtain spectral images that exhibited values close to the true radiance. These spectral images were corrected from the camera vignetting effect using an original method, and were normalized across acquisition dates. The

results showed that the Normalized Vegetation Indices calculated from vignetting-corrected images are acceptable indicators for crop monitoring purposes.

In conclusion, for quantitative remote sensing of terrestrial surfaces, the use of commercial digital cameras will increase in the future, thanks to the versatility and multispectral capacities of the available acquisition systems. Their versatility is increased thanks to the flexibility and cost of various lightweight acquisition systems (Ultra-Light Aircraft or Unmanned Aerial Vehicles) that can transport this type of camera. Modifications to camera filters permit narrow-band acquisitions in the visible and in the near-infrared domains; these measurements could be used for example to calculate hyperspectral indices like the PRI (Photochemical Index). However, in cases where bands are too narrow, more investigation is yet required to avoid motion blur due to the speed and vibrations of the aircraft.

Acknowledgements

The ground data acquisition was performed with help from Marion Houlès. The spectral characteristics of the digital cameras were measured in the ONERA laboratory in Toulouse, and we thank Mr Philippe Déliot for his assistance. This work is supported by the French Ministry of Agriculture (AgriDrone project) and the Reunion Region (V. Lebourgeois Fellowship).

References

1. Wee, A.G.; Lindsey, D.T.; Kuo, S.L.; Johnston, W.M. Color accuracy of commercial digital cameras for use in dentistry. *Dent. Mater.* **2006**, *22*, 553-559.
2. Stevens, M.; Parraga, C.A.; Cuthill, I.C.; Partridge, J.C.; Troscianko, T.S. Using digital photography to study animal coloration. *Biol. J. Linn. Soc.* **2007**, *90*, 211-237.
3. Cheung, V.; Westland, S.; Li, C.J.; Hardeberg, J.; Connab, D. Characterization of trichromatic color cameras by using a new multispectral imaging technique. *J. Opt. Soc. Am. A-Opt. Image Sci. Vis.* **2005**, *22*, 1231-1240.
4. Jafri, M.Z.M.; Abdullah, K.; Lim, H.S.; Ismail, W.R. Mapping of total suspended solids in reservoir using images captured by a conventional digital camera from a low-altitude light aircraft. In Proceedings of SPIE's Third International Asia-Pacific Environment Remote Sensing Symposium, Hangzhou, China, 24-26 October 2003; pp. 320-325.
5. Lejot, J.; Delacourt, C.; Piegay, H.; Fournier, T.; Tremelo, M.L.; Allemand, P. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surf. Process Landf.* **2007**, *32*, 1705-1725.
6. Crimmins, M.A.; Crimmins, T.M. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environ. Manage.* **2008**, *41*, 949-958.
7. Richardson, A.D.; Jenkins, J.P.; Braswell, B.H.; Hollinger, D.Y.; Ollinger, S.V.; Smith, M.L. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia*. **2007**, *152*, 323-334.
8. Jensen, T.; Apan, A.; Young, F.; Zeller, L. Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. *Comput. Electron. Agric.* **2007**, *59*, 66-77.

9. Hunt, E.R., Jr.; Cavigelli, M.; Daughtry, C.S.T.; Mc Murtrey, J.E.; Walthall, C.L. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precis. Agric.* **2005**, *6*, 359-378.
10. Johnson, L.F.; Bosh, D.F.; Williams, D.C.; Lobitz, B.M. Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality. *Appl. Eng. Agric.* **2001**, *17*, 557-560.
11. Mobasheri; Chahardoli, M.; Jokar, J.; Farajzadeh, M. Sugarcane phenological date estimation using broad-band digital cameras. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* **2008**, *3*, 468-475.
12. Vanamburg, L.K.; Trlica, M.J.; Hoffer, R.M.; Weltz, M.A. Ground based digital imagery for grassland biomass estimation. *Int. J. Remot. Sens.* **2006**, *27*, 939-950.
13. Cescatti, A. Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs - Methodology and comparison with standard thresholding techniques. *Agr. For. Meteorol.* **2007**, *143*, 1-12.
14. Kuusk, A.; Paas, M. Radiometric correction of hemispherical images. *ISPRS-J. Photogram Remot. Sens.* **2007**, *61*, 405-413.
15. Lelong, C.C.D.; Burger, P.; Jubelin, G.; Roux, B.; Labbé, S.; Baret, F. Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors* **2008**, *8*, 3557-3585.
16. Johnson, L.F.; Herwitz, S.R.; Lobitz, B.M.; Dunagan, S.E. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. *Appl. Eng. Agric.* **2004**, *20*, 845-849.
17. Sugiura, R.; Noguchi, N.; Ishii, K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosyst. Eng.* **2005**, *90*, 369-379.
18. Withagen, P.J.; Groen, F.C.A.; Schutte, K. CCD color camera characterization for image measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2007**, *56*, 199-203.
19. Zheng, Y.; Lin, S.; Kang, S.B. Single-image vignetting correction. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, US, 17-22 June 2006; pp. 461-468.
20. Goldman, D.B.; Chen, J.-H. Vignette and Exposure Calibration and Compensation. In Proceedings of the Eleventh IEEE International Conference on Computer Vision, Beijing, China, October 2005; pp. 899-906.
21. Solli, M.; Andersson, M.; Lenz, R.; Kruse, B. Color measurements with a consumer digital camera using spectral estimation techniques. In Proceedings of the 14th Scandinavian Conference on Image Analysis, Joensuu, Finland, 9-22 June 2005; pp. 105-114.
22. Dallas, W. J.; Roehrig, H.; Redford, G. R. Use of a color CMOS camera as a colorimeter - art. no. 63191K. In Proceedings of Hard X-Ray and Gamma-Ray Detector Physics and Penetrating Radiation Systems VIII Conference, San Diego, US, 4-17 August 2006; pp. K3191-K3191.
23. Déliot, P.; Duffaut, J.; Lacan, A. Characterization and calibration of a high-resolution multi-spectral airborne digital camera. In Proceedings of the 20th Congress of the International Commission for Optics, Changchun, China, 21-25 August 2005; pp. 603104:1-603104:10.
24. Labbé, S.; Roux, B.; Bégué, A.; Lebourgeois, V.; Mallavan, B. An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras: Characterization and acquisition guidelines. In *Proceedings of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Workshop* Newcastle, United-Kingdom, 11 - 14 September 2007; pp. TS10:1-TS10:6.

25. Lebourgeois, V.; Bégué, A.; Martiné, J.-F. Sensitivity of airborne-derived crop water deficit indices to the cropping practices. In *Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition*, Hersonissos, Crete, Greece, 23-25 June 2008.
26. Serrano, L.; Filella, I.; Penuelas, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop. Sci.* **2000**, *40*, 723-731.
27. Hinzman, L.D.; Bauer, M.E.; Daughtry, C.S.T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remot. Sens. Environ.* **1986**, *19*, 47-61.
28. Yu, W. Practical anti-vignetting methods for digital cameras. *IEEE Trans. Consum. Electron.* **2004**, *50*, 975-983.
29. Schott, J.R.; Salvaggio, C.; Volchok, W.J. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sens. Environ.* **1988**, *26*, 1-16.
30. El Hajj, M.; Bégué, A.; Lafrance, B.; Hagolle, O.; Dedieu, G.; Rumeau, M. Relative Radiometric Normalization and Atmospheric Correction of a SPOT 5 Time Series. *Sensors* **2008**, *8*, 2774-2791.
31. Rouse, J.W.; Hass, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS Tech. Report No. Accession Number: 74N30727*; Document ID: 19740022614. NASA Center, 1974.
32. Gitelson, A.A.; Kaufman, Y.J.; Merzlyak, M.N. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* **1996**, *58*, 289-298.
33. Gitelson, A.A.; Kaufman, Y.J.; Stark, R.; Rundquista, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.* **2002**, *80*, 76-87.
34. Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.* **1984**, *76*, 300-306.
35. Milton, E.J. Low-cost ground-based digital infra-red photography. *Int. J. Remote Sens.* **2002**, *23*, 1001-1007.
36. Wuller, D.; Gabele, H. The usage of digital cameras as luminance meters. In *Proceedings of the SPIE Digital Photography III Conference*, San Jose, CA, US, Jan 29-30 2007; pp. 650201:1-650201:11.

© 2008 by the authors; licensee Molecular Diversity Preservation International, Basel, Switzerland. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

ARTICLE 2

Atmospheric Corrections Of Low Altitude Thermal Infrared Airborne Images Acquired Over A Tropical Cropped Area

In "Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium"

Boston (USA), 6-11 July 2008, (III) 672-675

ATMOSPHERIC CORRECTIONS OF LOW ALTITUDE THERMAL INFRARED AIRBORNE IMAGES ACQUIRED OVER A TROPICAL CROPPED AREA

V. Lebourgeois^a, S. Labbé^b, F. Jacob^c, A. Bégué^b

^a CIRAD, UR SCA, Chemin de Grand Canal, BP20, 97408 Saint Denis Messagerie Cedex, Ile de La Réunion, France - valentine.lebourgeois@cirad.fr

^b UMR TETIS (CEMAGREF-CIRAD-ENGREF), 500 rue J-F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, France, - (sylvain.labbe, begue)@teledetection.fr

^c UMR LISAH (SupAgro-INRA-IRD), 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 1, France, - frederic.jacob@supagro.inra.fr

ABSTRACT

Accurate corrections of atmospheric effects on thermal infrared remote sensing data are an essential pre-requisite for the development of thermal infrared airborne-derived crop water stress indices. These corrections can be performed using ground surface temperature measurements, which are time consuming and expensive. Atmospheric effects can also be corrected using radiative transfer models that require knowledge of atmospheric status. The latter can be accurately characterized from radiosoundings, but these are usually unavailable. It can also be derived from meteorological model simulations, but spatial and temporal resolution are often too coarse. This study proposes performing atmospheric corrections by using temperature and relative humidity profiles acquired in flight from on-board sensors during data collection. Such measurements are used to document the atmospheric radiative transfer model MATISSE. First results from an experimentation over a tropical cropped area show that corrections are made with a 1.46 °K accuracy.

Index Terms— Atmospheric corrections, Thermal Infrared, Airborne images, Matisse software.

1. INTRODUCTION

Surface temperature of canopy is known to be strongly related with the water status of the crop and is widely used for development of water deficit indices ([3], [6]). Several factors affect the thermal infrared response of a vegetative canopy as its temperature is both determined by external environmental factors and by internal plant factors ([2]). The availability of bolometric cameras at affordable price used in combination with ultralight aircraft or unmanned aerial vehicle pave the way for new water stress survey methods in precision farming applications.

When remotely sensed from airborne or spaceborne sensors, the thermal infrared signal emitted by crops has to be corrected for atmospheric effects ([5]). These corrections can be derived from ground surface temperature measurements, which is tedious and expensive. They can also be calculated from radiative transfer simulations. The latter however require accurate information about atmospheric status between the target and the sensor, such as vertical profiles of temperature, humidity, pressure, and atmospheric content in aerosols and molecular gases ([4]). Atmospheric profiles can be derived from radiosoundings, but these are usually unavailable or do not coincide in time or in space. They can also be derived from atmospheric models after reanalysis procedures, but the spatial and temporal samplings (100 km and 6 hours) are too coarse. Moreover, changes of low-altitude atmospheric conditions can occur rapidly in tropical zones and near real-time parameters should be taken into account for adequately correct the atmospheric effects.

This paper presents a method to correct the atmospheric perturbations on thermal measurements collected from on board cost effective sensors, by using measurements of air temperature and relative humidity at different altitudes during the flight. Radiative transfer function is computed using the MATISSE (Advanced Earth Modeling for Imaging and Scene Simulation, [1]) software. The experiment was conducted in Reunion Island (a French tropical overseas department located in the Indian Ocean), over sugarcane fields in 2007. First results indicate that without requiring ground-truth surface temperature measurements or radiosounding data, this method could provide an alternative cost-efficient correction of atmospheric effects with enough accuracy for crop stress monitoring.

2. DATA ACQUISITION

Airborne and ground acquisitions were performed during 5 months, twice a month, over an experimental sugarcane field. In order to capture large temperature contrasts, flights occurred around solar noon during sunny days.

2.1. The airborne acquisition system

The airborne acquisition system consisted of an Ultra Light Aircraft equipped with a B20 HSV FLIR micro-bolometer thermal infrared camera (Fig.1.a). The radiance, detected over the $[7.5 - 15] \mu\text{m}$ spectral interval, is expressed in equivalent temperature assuming a target emissivity equal to unity. The system provided 240 pixel x 320 pixel images with a radiometric resolution of 0.1°K and an absolute precision of 2°K . To achieve the meteorological and location measurements, a temperature and relative humidity probe (Fig.1.b) coupled to a data logger was loaded in the Ultra-Light Aircraft, as well as a GPS that recorded the altitude and position during the flight. These measurements are next used to generate temperature and relative humidity profiles as functions of altitude. Images were taken from 300 m to 1300 m in order to study the sensitivity of the signal to atmospheric transmittance.

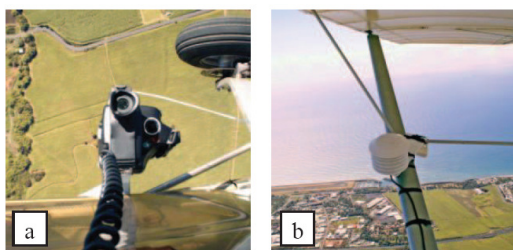


Fig.1: (a) Thermal infrared camera B20HSV, Flir Systems®, (b) Temperature and relative humidity sensor, HMP50 Campbell®

2.2. Ground acquisitions

Ground data were simultaneously acquired with airborne acquisitions on cold (sugarcane canopy), hot (dark tissue or stone road) and intermediate (grassy road) targets (see example in Fig.2). The instrument used was a hand-held infrared thermometer HEITRONICS® KT19 that measured the target temperature from the incoming radiance over the $[8 - 14] \mu\text{m}$ spectral interval, by assuming a target emissivity of 1. The lens FOV was about 13.5° . Due to the sugarcane height, the thermometer was mounted on a mast for vertical acquisitions over the canopy, such as angular variation between airborne and in situ measurements were avoided (Fig.3). Consequently, the measurements provided a circular footprint diameter of approximately 25 cm on sugarcane (cold) target, and 95 cm on hot and intermediate temperature

targets. Air temperature and humidity were also recorded with the same temperature and relative humidity probe as on the aircraft.

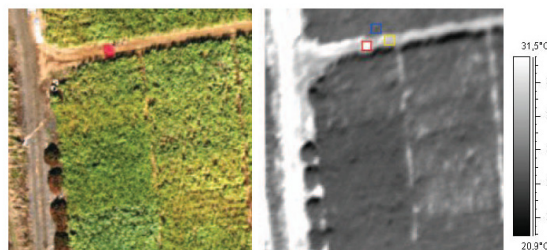


Fig.2: Location of the targets on a visible (left) and thermal infrared image (right). Targets are surrounded in red (hot), yellow (intermediate) and blue (cold) color.



Fig.3: In-situ measurements of surface temperature using a hand-held infrared thermometer HEITRONICS KT19® mounted on a mast.

3. DATA ANALYSIS AND RESULTS

3.1. Sensors calibration

Both thermal infrared sensors (KT19 and B20HSV camera) were calibrated against a blackbody for temperatures ranging between 290 and 315 °K. The calibration results obtained from the thermal infrared camera B20HSV were consistent with those obtained from the KT19 sensor. Mean of different measurements was 0.15°K between the two sensors and both sensors were always better than 0.4°K accurate in reference to the blackbody absolute temperature. Therefore, no corrections were applied to the temperature values given by the sensors.

3.2. Data Analysis

First of all we tried to linearly relate the ground thermal infrared measurements and the airborne thermal images for each acquisition date. Thus the mean temperature of each target was calculated from airborne data set and compared against ground-truth measurements. As displayed by Fig.4 for a given acquisition date, the linear regressions showed that measured temperature of surface objects decreased with

altitude, which was explained by the attenuation of surface signal when surface is hotter than atmosphere. The constant term of the regressions increased with altitude, which was explained by the atmospheric signal proportion of the measurements. For measured temperatures closer to air temperature, altitude effects were lower as can be seen in Fig.4 for cold targets (surrounded with blue color).

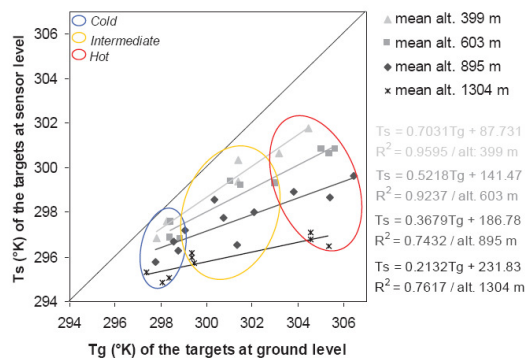


Fig.4: Relation between surface (T_g) and sensor airborne temperature (T_s) measurements acquired on 27th July 2007 at different altitudes. Colored circles indicate the type of target. Linear regressions for each altitude are plotted with a color gradient from light grey (lowest altitude) to black (highest altitude).

Those results (i.e. differences between surface and sensor level temperatures up to 9 °K) showed, as expected, the necessity to correct the airborne thermal infrared images from the atmospheric effects in order to accurately retrieve the actual surface temperature.

3.3 Variability of atmospheric effects

The linear regressions previously presented could be used to perform a coarse correction for a specific acquisition date. However, the terms of the linear regression between T_g and T_s , for a given altitude, were different from a date to another (Fig.5), with variations due to changes in atmospheric conditions (pressure, temperature and humidity). Thus, a global atmospheric correction model, based on linear regressions could not be used.

As the acquisition of ground surface temperatures on cold and hot targets simultaneously with the flights is not feasible for an operational monitoring of large cropped areas, another way to correct atmospheric effects is recommended. When using radiative transfer models, several difficulties related to estimation of atmospheric parameters are encountered. The use of radiosoundings is not easy because of unavailability or non coincidence in time or space. The use of atmospheric models after reanalysis procedures is also questionable because of coarse spatial and temporal resolution (currently 100 km and 6 hours). Therefore,

another way to carry out atmospheric corrections is proposed here, based on atmospheric radiative transfer simulations to be documented with in flight measurements of air temperature and humidity. This is presented in the following part.

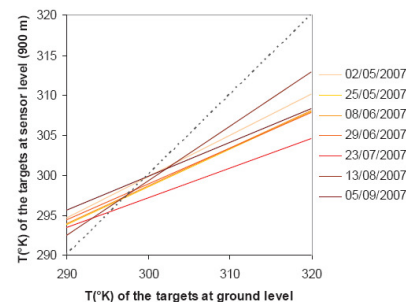


Fig.5: Relation between surface (T_g) and airborne sensor temperature for a given altitude (900 m) at different acquisition dates.

3.4. Matisse simulations

Atmospheric effects were studied using the Matisse 1.5.0 atmospheric radiative transfer model along with pressure, air temperature and relative humidity profiles. These profiles generally come from radiosoundings, that were, in our case, unavailable for the whole duration of the experimentation, except for one date (05/09/2007). Thus, for each acquisition date, temperature and relative humidity profiles were acquired with an on-board probe (HMP50), during the flight durations (i.e. approximately one hour).

For 05/09/2007 acquisition date, Fig. 6 shows that the two profiles acquired by the on-board probes and by the radiosounding (launched 1 hour and 45 minutes before airborne data acquisition 2 km away) were in good agreement, illustrating a satisfactory operating of the HMP50 sensor in the flight conditions.

For this date, we used MATISSE to simulate the collected ground temperatures at the sensor level using the two humidity and temperature data sources: the radiosounding and the profile acquired by the on-board probe. Simulated ground based temperatures at the sensor level were then compared against actual airborne measured temperatures. Results (Table.1) show an RMSE of 0.63 °K for the first one and 0.49 °K for the second one, highlighting a better accuracy for the solution implemented to replace radiosounding data.

The same comparison was performed between results from Matisse simulations of ground based temperatures along with airborne atmospheric profiles and actual thermal camera measurements for all acquisition dates and altitudes (Fig. 7). Simulated temperatures were in agreement with those acquired with the on-board camera. The root mean square errors, calculated for each type of targets (Table.2),

showed an accuracy of 1.05 °K for cold target, which corresponds to a sugarcane canopy. A larger drift were however noticed as target temperature increased. On going investigations are focused on understanding this drift for larger temperatures.

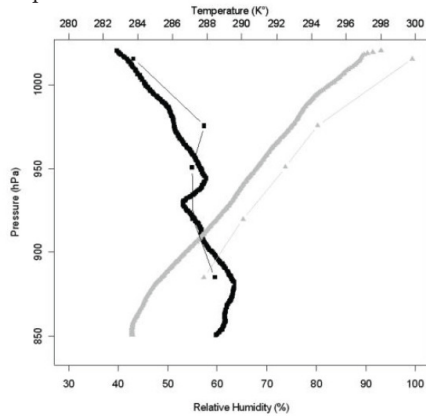


Fig.6: An example (thin lines) of air temperature (grey) and relative humidity (black) profile, acquired during the 5 September 2007 flight at 11:45 a.m. Thick lines correspond to a radiosounding profile launched the same day at 10:00 a.m. at Gillot airport.

	MATISSE simulations with:	
	Airborne profile	Radiosounding
RMSE Total (°K)	0.49	0.63
RMSE Cold target (°K)	0.63	0.82
RMSE Intermediate target (°K)	0.30	0.35

Table.1: Root Mean Square Errors between actual airborne measured temperatures and temperature simulated with two different atmospheric profiles.

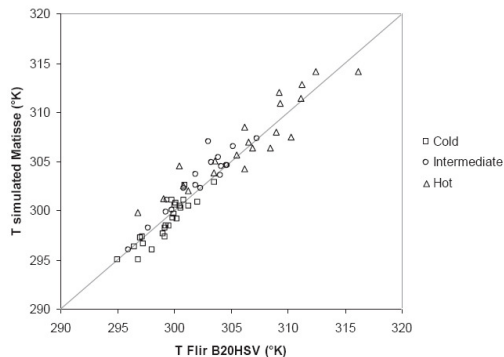


Fig.7: Relation between the temperature at sensor level (T Flir B20HSV) and the temperature simulated with Matisse software for the whole data set.

RMSE Total (°K)	1.46
RMSE Cold target (°K)	1.05
RMSE Intermediate target (°K)	1.28
RMSE Hot target (°K)	1.94

Table.2: Root Mean Square errors between simulated and actual airborne measured temperatures

5. CONCLUSION AND OUTLOOKS

The proposed original method to correct atmospheric effects on thermal airborne images via the use of an atmospheric radiative transfer model along with airborne-derived temperature and humidity profile show a sufficient accuracy for study of crop stress. Future investigations will focus on the potential of such on-board atmospheric information, with various degrees of complexity. This will hopefully provide solutions based on real time characterization of atmospheric status for the corrections of airborne thermal infrared remote sensing data.

6. ACKNOWLEDGMENTS

ONERA and especially Luc Labarre for help on Matisse Software. INRA – Avignon for sensor calibration. Marion Houllès from CIRAD for ground acquisitions in Reunion Island.

7. REFERENCES

- [1] P. Simoneau, R. Berton, K. Caillault, G. Durand, T. Huet, L. Labarre, C. Malherbe, C. Miesch, A. Roblin, B. Rosier, "MATISSE, Advanced Earth Modeling for Imaging and Scene Simulation", ESO/SPIE Europto European Symposium on Remote Sensing, Toulouse (France), September 17-21, 10p., 2001.
- [2] P. Boissard, G. Guyot, and al., "Factors affecting the radiative temperature of a vegetative canopy," Applications of remote sensing in agriculture, pp. 45-72, 1990.
- [3] R. D. Jackson, S. B. Idso, and al., "Canopy temperature as a crop water stress indicator," Water Resource Research, vol. 17, pp. 1133-1138, 1981.
- [4] F. Jacob, F. Petitcolin, T. Schmugge, and al., "Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors," Remote Sensing of Environment, vol. 90/2, pp. 137-152, 2004.
- [5] J. C. Jimenez-Munoz and J. A. Sobrino, "Error sources on the land surface temperature retrieved from thermal infrared single channel remote sensing data," International Journal of Remote Sensing, vol. 27/5-6, pp. 999-1014, 2006.
- [6] M. S. Moran, T. R. Clarke, and al., "Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index," Remote Sensing of Environment, vol. 46/2, pp. 246-263, 1994.

ARTICLE 3

Sugarcane crop status diagnosis using airborne-based imaging system in cases of combined water and nitrogen stress

Soumis en Avril 2009 à "Field Crop Research"

Sugarcane crop status diagnosis using airborne-based imaging system in cases of combined water and nitrogen stress

Lebourgeois, V.¹, Bégué, A.², Martiné, J-F.¹, Letourmy, P.³, Houlès, M.²

¹ CIRAD UPR SCA, Station La Bretagne, Saint-Denis, La Réunion, F-97408 France - valentine.lebourgeois@cirad.fr

² CIRAD UMR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, F-34093 France - agnes.begue@cirad.fr

³ CIRAD UPR SCA, Avenue Agropolis, Montpellier, F-34398 France - philippe.letourmy@cirad.fr

Abstract

Precision farming requires frequent information on crop conditions spatial and temporal variability. Image-based remote sensing is one promising techniques for precision crop management. In this study, we investigated the use of broad band multispectral (visible and infrared bands) and thermal airborne imagery for the characterisation of water and nutrient status in cases of combined stress on sugarcane crop. We worked during five months on a trial in which two sugarcane cultivars were grown with two levels of water inputs (rainfed / irrigated) and three levels of nitrogen (0 kg/ha/ 65 kg/ha/ 130 kg/ha). Seven ULM flights took place, coupled with ground crop measurements. For the nitrogen status characterisation, we tested a broad band version of the Simple Ratio Pigment Index (SRPI_b), calculated as the ratio of the numerical counts measured in the blue and red bands of the commercial digital cameras. Results showed a high correlation ($R^2 = 0.83$) between SRPI_b and SPAD readings (closely related to nitrogen status). We made the hypothesis that crop water stress indices (like WDI) derived from Vegetation Index / Temperature (VIT) approach were influenced by the nitrogen status of the crop in cases of combined stress because of nitrogen influence on leaf colour and consequently on spectral vegetation indices like NDVI. We proposed a colour correction of the NDVI using SRPI_b so that the NDVI better estimates the crop cover fraction required in VIT approach. This corrected NDVI was then used to calculate a corrected WDI. We compared the WDI values to the sheath humidity of the crop. Results showed an improved correlation between sheath humidity and corrected WDI ($R^2 = 0.57$) than with uncorrected WDI ($R^2 = 0.41$). We conclude on the capacity of such airborne acquisition systems to provide spatially distributed nitrogen and water stress indices through time.

Keywords

Water stress, nutrient stress, sugarcane, WDI, SPAD, thermal infrared, digital cameras, precision farming

1. Introduction

Nitrogen (N) and water are the main inputs with significant effects on the productivity of sugarcane crops (Wiedenfeld 1995). Moreover, the response of sugarcane to N fertilisation decreases as crop water stress increases (Ingram and Hilton 1986; Wiedenfeld 1995), showing a strong link between water availability and N assimilation by the crop.

Accurate estimation of the spatial distribution of crop water and nutrient status is thus of great importance for site-specific management of inputs in sugarcane crops. These estimates must also be dynamic, requiring real-time spatial information. Image-based remote sensing can provide relevant information for the non-destructive measurement of crop nitrogen and water stress through measurements of the spectral and thermal properties of crop canopies (Moran 2000; Moran et al. 2003; Moran et al. 1997; Pinter Jr. et al. 2003).

Water status affects leaf transpiration, resulting in changes in leaf temperature. This mechanism can also be observed when the canopy is considered as a whole (Idso and Baker 1967). Consequently, plant temperature has long been recognised as a potential indicator of the water status of crops, resulting in the development of many thermal infrared data-derived indices of crop water status. The Crop Water Stress Index (CWSI) (Idso 1982; Jackson et al. 1981) is one of the most common indices used in agricultural applications, but has the drawback of being limited to fully vegetated canopies. When thermal infrared spectra are remotely sensed at the vertical mode using an aircraft platform, the difficulty in interpreting these data as an index of crop water stress is linked to the proportion of soil that can be viewed by the sensor over partial crop cover. To overcome these limitations, (Moran et al. 1994) developed the Vegetation Index / Temperature (VIT) concept, which allows for the application of the Crop Water Stress Index (CWSI) to partially covered canopies. It is based on the relationship between surface minus air temperature and a spectral vegetation index, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse et al. 1973), representing the crop cover fraction. From this concept, Moran et al. (1994) developed the Water Deficit Index (WDI), which is related to the ratio of actual (ET) and potential (PET) evapotranspiration ($WDI = 1 - ET / PET$) and which is adapted to partially covered and fully

vegetated canopies. Two other indices have recently been introduced to account for the influence of canopy cover (also given by a spectral vegetation index) on image temperature: the two-dimensional CWSI (2D-CWSI) (Barnes et al. 2000) and the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) (Sandholt et al. 2002). However, the NDVI, which is often used in VIT approaches, is influenced by both structural (e.g., Leaf Area Index and cover fraction) and biochemical (e.g., chlorophyll) (Jacquemoud et al. 2000) properties of the canopy that depend on the availability of water and nitrogen to the crop. This can limit the ability of the NDVI to estimate a specific variable (here, cover fraction) in the case of combined stresses, such as when the crop is affected by variations in leaf pigment concentrations (Haboudane et al. 2004) that can be due to nitrogen deficiency. Nitrogen status affects the chlorophyll content of leaves (Penuelas and Filella 1998), altering the canopy reflectance in the red and blue bands (chlorophyll and carotenoids absorption) (Chappelle et al. 1992). Indices using ratios or normalised differences between specific, narrow red and blue wavebands have been shown to be linked with chlorophyll content and thus with the nitrogen status of the crop (Carter and Miller 1994; Penuelas et al. 1995; Penuelas et al. 1994; Penuelas et al. 1993).

Many remote sensing studies report results from single factor experiments in which either nitrogen or water status is accurately estimated using multispectral (visible and near infrared) and thermal measurements. The difficulty frequently observed in operational monitoring is to discriminate stress induced by water limitation from stress caused by a lack of a nutrient. Few studies (Barnes et al. 2000; El-Shikha et al. 2007; Tilling et al. 2007) have tested the coupling of the VIT approach with spectral indices designed to measure canopy-level N in order to assess the water and nitrogen status of a crop. In broccoli, El-Shikha et al. (2007) found that nitrogen status has no effect on VIT, while results for wheat are inconclusive (Tilling et al. 2007) because the observations from different experimental years are contradictory. Further research is needed to evaluate the effect of nitrogen deficiency on the ability of VIT indices to characterise the water status of crops (Tilling et al. 2007).

Because the NDVI, which is often used in VIT approaches, is influenced by both the structure and the spectral properties of leaves, we hypothesise that the VIT approach is affected by the nitrogen status of a crop through under-estimation of the crop cover (because of diminished NDVI values due to yellowing leaves). To support this hypothesis, we must simultaneously characterise the water and nitrogen statuses of a sugarcane crop using multispectral data (visible, near infrared and thermal infrared). The general objective of this study is to test the ability of an ultra-light airborne system equipped with multispectral sensors (visible, near infrared and thermal) to characterise the water and nutrient statuses of sugarcane crops in

cases of combined stress. To do this, we 1) test a spectral index to indicate the nitrogen status of the crop via characterisation of the colour of the leaves, 2) propose a method of colour correction to increase the sensitivity of the NDVI to the fraction of vegetative cover, and 3) evaluate the effect of this correction on the ability of the WDI to characterise the water status of the plants in the case of combined water and nitrogen deficiencies.

2. Materials and methods

The investigation took place over a 5 ha experimental sugarcane field in the humid region of Reunion Island. From May to September 2007, seven experimental flights coupled with ground measurements were conducted.

Study site description: trial and environmental conditions

The experimental sugarcane field was located in La Mare, Sainte Marie (20.9°S 55.5°E; average altitude of 60 m). Two sugarcane cultivars (R579 and R570) were grown under three nitrogen input levels (designated 0/N, 65/N, and 130/N in kg/ha) and two water treatments (irrigated or rainfed), making twelve treatments in a randomised block design with three replicates. For each combination of treatments (cultivar, nitrogen, irrigation), the size of the plot in each block was 135 m². Each plot comprised 5 rows 18 m in length, with a 1.5 m inter-row separation (Figure 1). Nitrogen was applied twice, one month and three months after the previous harvest. The sugarcane field was in its seventh month of growth at the beginning of the experiment in May. This corresponds to the period of greatest growth, during which sugarcane water consumption is highest (Gascho 1985). The mean annual rainfall in the study area was 1514 mm. In the irrigated blocks, irrigation stopped on 5 September.

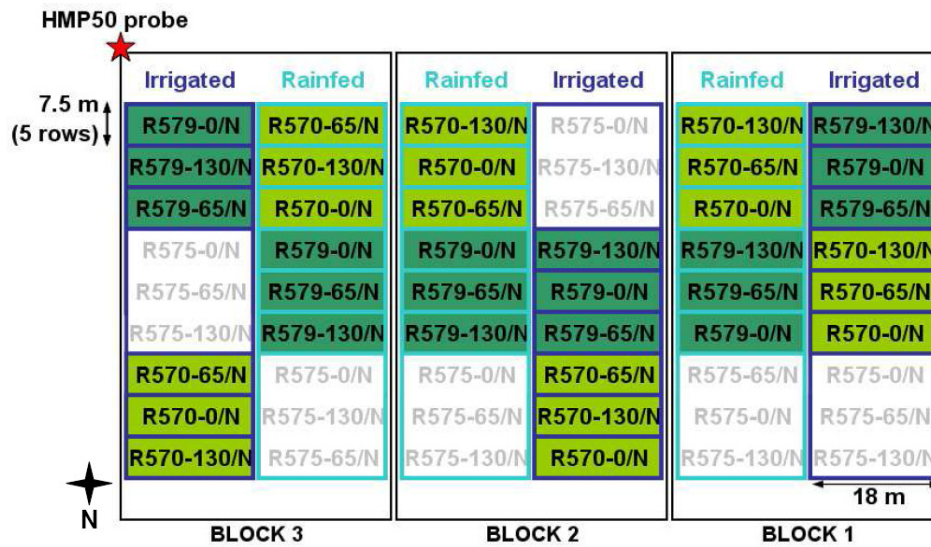


Figure 1: Layout of the La Mare experimental field.

Figure 2 shows the environmental conditions during the experiment (data obtained from a weather station located near the experimental site). During the experimental flights (highlighted with black arrows in Figure 2), air temperature at field level was recorded every 5 minutes using a HMP50 probe (Campbell Scientific) connected to a data logger (CR21x, Campbell Scientific).

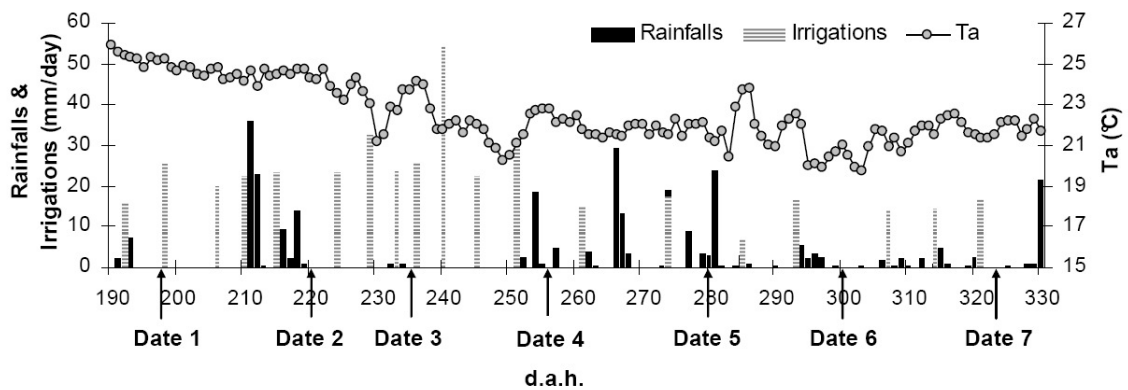


Figure 2: Daily mean temperatures and timing of rainfall and irrigation events during the experiment (La Mare, CIRAD). Black arrows show the experimental flights dates.

Measurements of crop state variables

Crop measurements were performed monthly on the 36 trial plots, but not simultaneously with the experimental flights. The data collection protocol was designed to be as non-destructive as possible in order not to damage the structure of the crop.

To assess the relative green LAI (referred to here as LAI) for each treatment, the number of stalks was counted in the three central rows of each plot, and the stalk height up to the top visible dewlap (Htvd) and the number of green leaves (Ngl) were measured for twelve stalks per plot (four stalks per row). We then calculated the total surface area of green leaves per stalk (Tsgl) using the following exponential regression, developed by (Martiné, unpublished observation, 2004):

$$Tsgl = a * (1 - \exp(-b * Htvd * Ngl)) \quad \text{Equation 1}$$

where Tsgl is expressed in cm² and Htvd in m. Coefficients a and b, as well as the standard error and correlation coefficient for each cultivar, are given in Table 1.

We then calculated LAI by multiplying the mean Tsgl of the twelve measured sugarcane stalks by the number of stalks per row and dividing by the soil surface area.

Cultivar	a	b	Standard Error	Correlation Coefficient
R570	10747.5	0.098	258.6	0.997
R579	8024.1	0.114	266.5	0.995

Table 1: Regression parameters of the relationship between the total green leaf surface area per stalk and two plant measurements (Htvd: stalk height up to the top visible dewlap; Ngl: number of green leaves) (Equation 1).

The crop water status was assessed using sheath humidity measurements. The measurements were performed on only four sugarcane plants per plot to avoid crop damage. All sheaths were removed from the stalks of the four plants and weighed before and after a 48 h period in a drying oven in order to calculate the percentage of water.

The crop nitrogen status was estimated by measuring the chlorophyll content of the leaves. We used an optical chlorophyll-meter (SPAD-502, Konica Minolta) whose measurements have been shown to be linked with the nitrogen status of crops (El-Shikha et al. 2007; Fois et al. 2009). We tested this assumption on sugarcane by measuring leaf nitrogen concentration

[N] and SPAD values in the experimental field three times per growing cycle from 2005 to 2007. SPAD values were measured on the third median of the first three leaves beneath the top visible dewlap. The following linear regression (Figure 3) was derived from the measurements, showing a good correlation (p-value < 2.2 e-16) between SPAD values and nitrogen status:

$$[N] = 0.631 * SPAD - 1.884 \quad \text{Equation 2}$$

where [N] is expressed in g/kg and SPAD in SPAD units.

Therefore, we used SPAD values as an index of nitrogen status in this study. Measurements were performed monthly on 30 leaves per plot and averaged in order to obtain a mean SPAD value per plot.

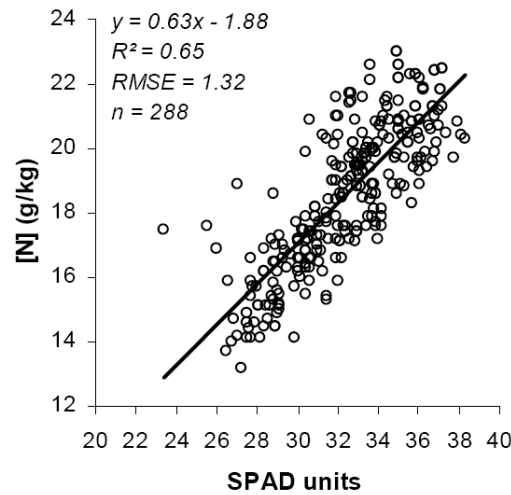


Figure 3: Linear regression between SPAD values and nitrogen concentration of the leaves [N].

Spectral image acquisition

Thanks to the miniaturisation of thermal sensors and the development of commercial digital cameras that can be mounted in light airborne vectors, remote sensing methods are now easier to implement for operational monitoring (Lebourgeois et al. 2008a; Lebourgeois et al. 2008b; Lelong et al. 2008; Moran et al. 2003). These systems provide low-cost imagery with very high resolution. The data acquisition system used in this experiment consisted of an ultra-light aircraft equipped with sensors that measured the sunlight reflected in four different spectral

bands, as well as the radiation emitted by the Earth's surface. To measure the radiometric signal in the visible RGB spectral bands (Red, Green and Blue), a commercial camera (EOS 400D, Canon) was used. The same type of camera was adapted and equipped with a 710 - 855 nm band pass filter (XNiteBPG, LDP LLC) to measure the radiation in the Near Infrared (NIR) spectral band. The settings of the two cameras (aperture, shutter speed, and sensitivity) were kept unchanged throughout the duration of the experiment. Images were recorded in raw format, allowing us to work on unprocessed CMOS data files. The normalised spectral sensitivities of the RGB and NIR sensors are given in (Lebourgeois et al. 2008a).

The radiation emitted by the canopy was also measured using a microbolometer thermal infrared (TIR) camera (B20 HSV, FLIR). The radiance detected over the 7.5 – 13 μm spectral band is equivalent to the temperature, assuming a target emissivity equal to unity. The system provided 240 x 320-pixel images with a radiometric resolution of 0.1°C and an absolute precision of 2°C.

Seven airborne data sets were acquired between May and September with identical camera tuning. The images were acquired in vertical mode, at 600 m altitude over the experimental field, between 11:00 and 12:00 a.m. solar time. The ground resolution of the images was 10 cm for those taken in the visible and near infrared bands and 65 cm for those acquired in the thermal band.

Spectral image pre-processing

Several processing steps were necessary to retrieve comparable pixel values over space and time. The corrections concerned the geometry and the radiometry of the images and were due both to the sensor itself and to the acquisition conditions.

The signal measured by a numeric camera is not linearly proportional to the radiance of the target. Factors affecting the signal are related to features of the camera (colour processing algorithms, camera settings and vignetting) and environment (sun geometry, atmosphere and flight altitude). The correction steps that were applied to the images (decoding the digital photo format and vignetting correction) are described in (Lebourgeois et al. 2008a). The geometric distortion of the Canon cameras was very low (Pierrot-Desseilligny, personal communication, 2008), and consequently no geometric correction was applied.

When remotely sensed from airborne sensors, the thermal infrared signal emitted by crops must be corrected for atmospheric effects (Jimenez-Munoz and Sobrino 2006). To correct for these effects, we used linear regressions established between ground and airborne surface

temperature measurements for each acquisition date [see details in (Lebourgeois et al. 2008b)].

Blue, green, near infrared and thermal infrared images were co-registered using the red band as a reference.

Calculation of indices

From the red and near infrared acquisitions, we derived the Normalised Difference Vegetation Index (Rouse et al. 1973):

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \quad \text{Equation 3}$$

where R and PIR are the corrected digital values recorded by the cameras in the red and near infrared bands, respectively.

The Simple Ratio Pigment Index, designed to forecast nitrogen status (Penuelas et al. 1994), is calculated as the ratio between the reflectances at 430 and 680 nm wavelengths. We calculated a broadband SRPI (SRPI_b) derived from this formalism by calculating the ratio between the signal measured in the blue and red bands:

$$\text{SRPI}_b = \text{B} / \text{R} \quad \text{Equation 4}$$

where B and R are the corrected digital values recorded by the cameras in the blue and red bands, respectively.

The Vegetation Index / Temperature concept is based on the trapezoidal shape formed by the relationship between $(T_s - T_a)$ and vegetation cover (Figure 4.a), which can be represented by a spectral vegetation index such as NDVI. Theoretical equations for computation of the trapezoid vertices are given in (Moran et al. 1994). WDI has been defined from this concept (Moran et al. 1994). It is related to the ratio between actual (ET) and potential evapotranspiration (PET) and can be calculated using the following equation:

$$\text{WDI} = 1 - \text{ET} / \text{PET} = \frac{(T_s - T_a)_{\min} - (T_s - T_a)}{(T_s - T_a)_{\min} - (T_s - T_a)_{\max}} \quad \text{Equation 5}$$

Where $(T_s - T_a)_{\min}$, $(T_s - T_a)_{\max}$, and $(T_s - T_a)$ correspond to points A, B and C, respectively (Figure 4.a).

The analytical calculation of WDI requires on-site measurements of net radiation (R_n), wind speed (u), vapour pressure deficit (VPD) and air temperature (T_a), as well as estimation of the maximum and minimum possible stomatal resistances for the considered crop. When these inputs are missing, WDI can be defined empirically (Clarke 1997) by calculation of the trapezoid based on the image data. However, defining empirical WDI boundaries is not easy when the scenes viewed by the airborne optical and thermal infrared sensors do not contain the dry and wet bare soil and vegetated states corresponding to the vertices of the trapezoid. Therefore, we chose to define the WDI boundaries using a statistical method (Figure 4.b) by calculating the 1% and 99% quantiles of NDVI for the upper and lower limits. Lines (1-3) and (2-4) (Figure 4.a) were defined by calculating the 1% and 99% quantile regressions of ($T_s - T_a$) as a function of NDVI. The calculations were carried out using the R software, according to Koenker (2008). An example of calculated WDI boundaries is given in Figure 4.b for the first date of airborne data collection (198 days after harvest).

The image data set used to calculate WDI corresponded to the experimental sugarcane plot surrounded by bare soil lanes with sparse vegetation.

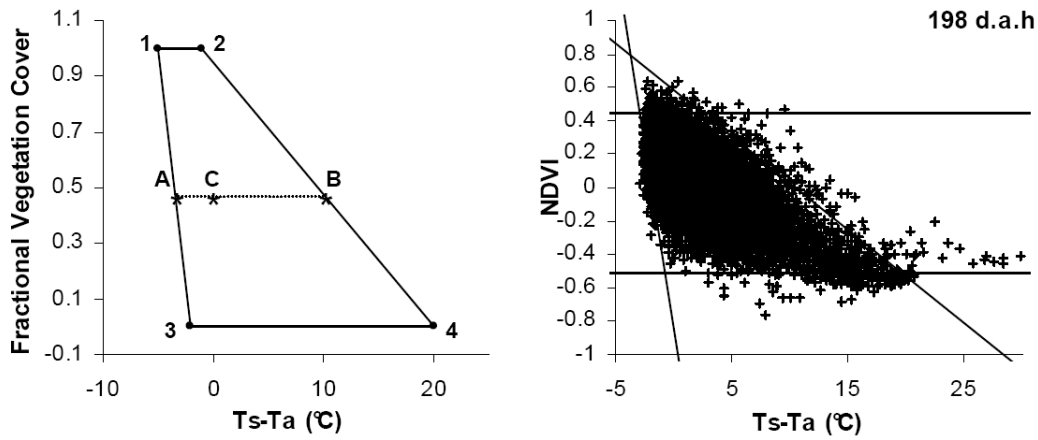


Figure 4: (a) Illustration of Moran's VIT concept and WDI calculation. 1: Well watered and fully closed vegetation cover, 2: Water stress and fully closed vegetation cover, 3: Saturated bare soil, 4: Dry bare soil. For any point C, WDI is equal to the ratio between AC and BC. (b) Example of WDI boundaries defined using the statistical method (on date 1: 198 days after harvest).

Colour correction of NDVI values

To correct the NDVI values based on leaf colour, we calculated for a given LAI level, the relationship between NDVI and the SRPI_b for a given crop, and normalised the NDVI to a nominal value of SRPI_b. The correction equation was:

$$\text{NDVI}_{\text{cor}} = \text{NDVI} * C * n \quad \text{Equation 6}$$

where C is the correction coefficient corresponding to the slope between NDVI and the SRPI_b, and n is the nominal value of SRPI_b (a reference value).

3. Results and discussion

Seasonal trends in the crop state variables

Figure 5 shows the temporal changes in crop state variables, linearly interpolated between two measurement dates in order to correspond to the seven airborne acquisition dates.

Figure 5.a shows the interpolated LAI data set, with low seasonal trends and high inter-treatment variation. The seasonal trend in LAI based on the average across treatments was globally low as the experiment began late in the sugarcane-growing season (about 6 months after harvest). For irrigated crops, the near-stability of the LAI values indicates that crop growth was almost finished. For rainfed plots, similar stability was observed for cultivar R570 after 230 days after harvest, while LAI values for cultivar R579 continued to increase up to the end of August (300 days after harvest). The inter-treatment variability in LAI is high, with a range between 3.5 and 5.5. This variability is mainly due to the effects of the nitrogen treatment (mean values of 5.02, 4.80, and 4.24 for 130/N, 65/N, and 0/N, respectively), followed by the water treatment (4.92 and 4.46 for irrigated and rainfed, respectively) and the cultivar (4.64 and 4.74 for R570 and R579, respectively). LAI values for cultivar R579 are always higher than those of cultivar R570 in irrigated treatments. The opposite effect is observed for rainfed treatments, showing that R579 is more sensitive to water treatment, while R570 is more tolerant.

Figure 5.b shows the interpolated SPAD data set. The general trend is a decrease in SPAD values for all treatments (with a mean loss of 6 SPAD units from the beginning to the end of the experiment), mainly due to plant senescence. However, the decreases in SPAD values of

the rainfed plots are less regular than those of the irrigated plots, and show two periods of more rapid decrease corresponding to two dry periods, but with a lag of 10 to 15 days. An equivalent time lag between nitrogen stress events and SPAD values has been observed in potato plants. The range of SPAD values in the complete data set is large, between 17.8 and 35.8. A large part of this data variability is due to the nitrogen treatments, with differences of five and ten SPAD units between the 130/N and 0/N treatments for the same date and water conditions. On the other hand, the difference between the 130/N and 65/N treatments for rainfed plots is tiny, suggesting the under-utilisation of available nitrogen when water supply is limited (Wiedenfeld 1995). There are also small differences between irrigated (28.5) and rainfed (26.3) treatments, but these are not statistically significant. There is no effect of cultivar (average of 27.4 for both cultivars), as previously observed by (Pouzet, personal communication, 2008).

The sheath humidity was slightly increasing or stable up to 230 days after harvest, then decreased regularly from 78.6% to 68.8% (Figure 5.c). For the irrigated treatment, the decrease was quite regular, while for the rainfed treatment, the decrease was punctuated by dry periods with a lag of about five to ten days. No significant effects of cultivar or nitrogen treatment are found for sheath humidity (these treatments differ by less than 1.6%).

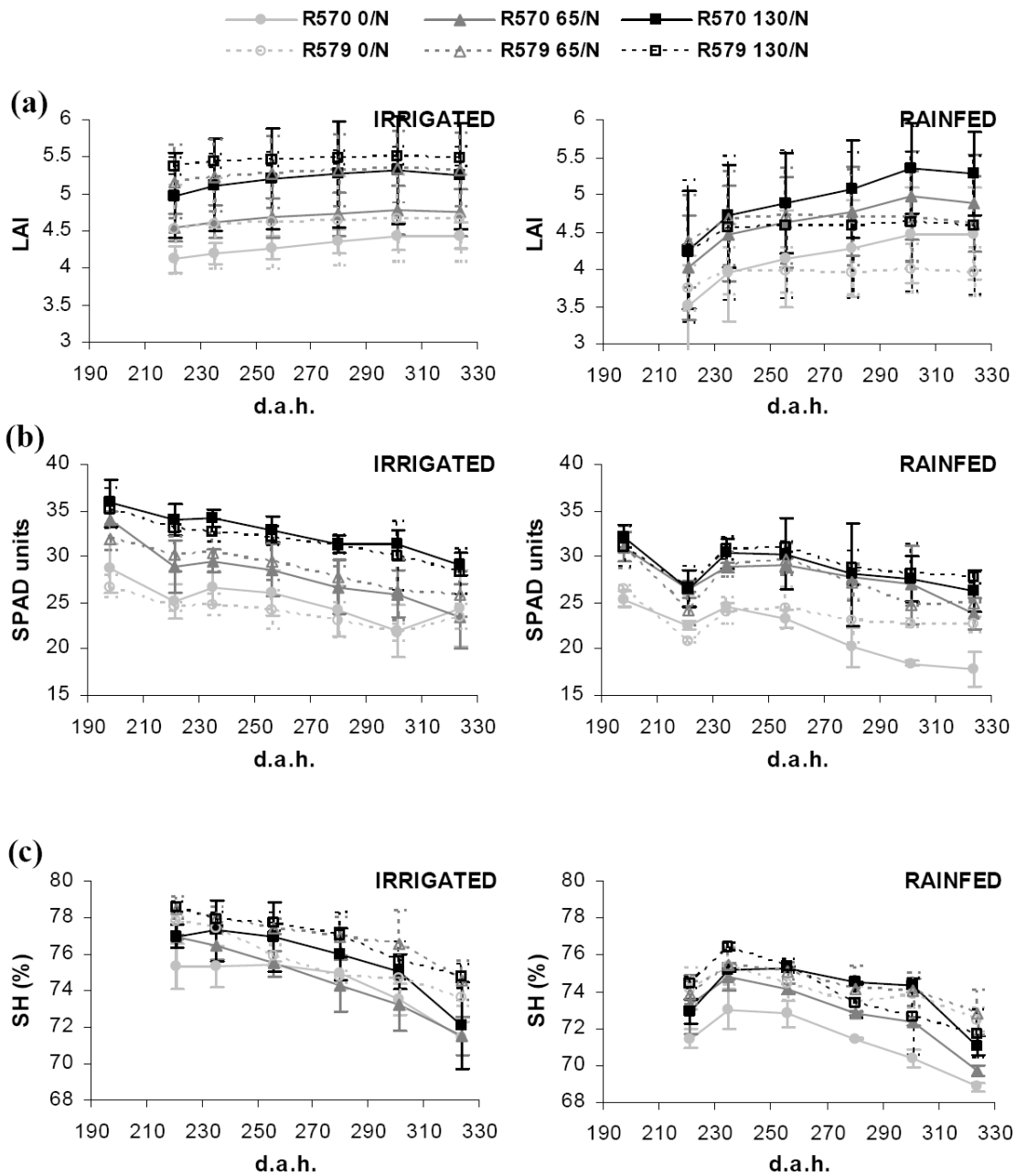


Figure 5: Temporal trends in crop state variables (interpolated data): (a) LAI, (b) SPAD, and (c) Sheath humidity (SH) for irrigated (left) and rainfed (right) treatments.

Seasonal trend of the spectral variables

For all treatment and cultivar combinations, the seasonal trend in NDVI shows a small increase at the beginning of the experiment (up to 230 days after harvest, due to the continuing increase in LAI), followed by a general decrease (senescence) until harvest (Figure 6.a). For rainfed plots, the NDVI trend is characterised by variations due to dry (decrease in

NDVI) and rainy (increase in NDVI) periods, with a time lag of 10 to 20 days (the mean interval between two airborne acquisitions) between weather events and the observed response in NDVI. The significant difference in NDVI values among the nitrogen treatments demonstrates a strong relationship between crop nutrition and the radiometric index (Haboudane et al. 2004). The 0/N treatment displays very low values of NDVI (between 0.15 and 0.2 NDVI units less than those of the 130/N treatment) due to a combination of the effect of low nitrogen on plant development (low LAI) and the yellowish colour of the leaves. Water treatment is also important, resulting in an average decrease of 0.12 NDVI units between the irrigated and rainfed plots for all measurement dates. The cultivar effect is almost inexistent (the cultivars differ by less than 0.02 NDVI units).

The SRPI_b displays a general decrease during the experiment (Figure 6.b). We observe a strong nitrogen effect, with a mean difference of 0.12 between the 130/N and 0/N treatments. Water supply also affects this index, with higher SRPI_b values for irrigated plots compared to rainfed plots. A cultivar effect, which was more pronounced for irrigated plots, is also observed.

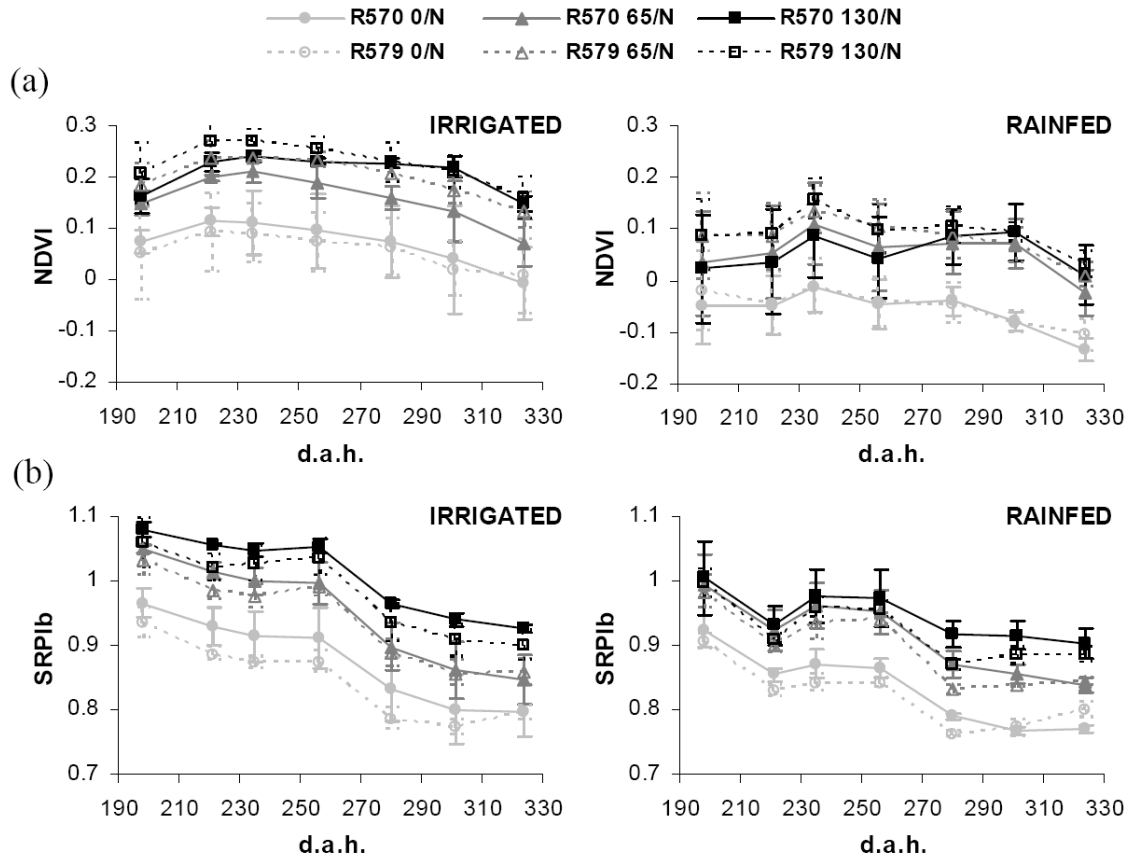


Figure 6: Temporal trends in spectral variables for the seven acquisition dates: (a) NDVI and (b) $SRPI_b$ for irrigated (left) and rainfed (right) treatments.

Relationship between $SRPI_b$ and nitrogen status

The linear regression between $SRPI_b$ and SPAD values for all treatments and all dates is shown in Figure 7. The relationship is very strong, with $R^2 = 0.83$ and a Root Mean Square Error of 1.55 SPAD units. A dummy variable analysis indicates that the relationship is statistically independent of the water and nitrogen treatments (**), which confirms the sensitivity of the $SRPI_b$ index to leaf colour, whatever the treatment.

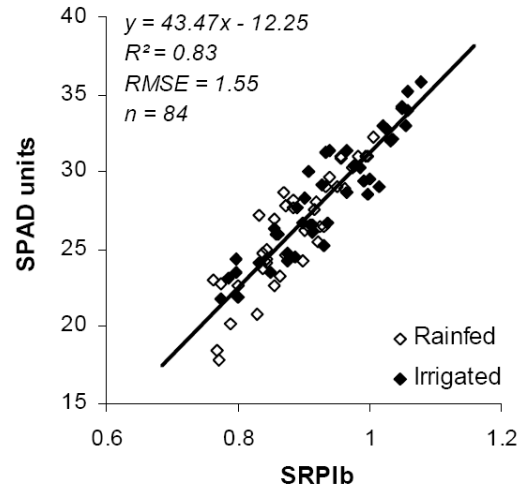


Figure 7: Linear regression between $SRPI_b$ and SPAD values.

Correction of the NDVI values

Figure 8 shows the relationships between NDVI and $SRPI_b$ for different LAI classes. When all LAI classes are grouped, the overall relationship is fairly strong ($R^2 = 0.64$), but with high dispersion ($RMSE = 0.06$). This is because NDVI depends upon the structure (LAI) and colour of leaves, while $SRPI_b$ mainly depends upon leaf colour (Figure 7). To reduce the dispersion, we arbitrarily divided the LAI data set into 4 classes: greater than 5, between 4.5 and 5, between 4 and 4.5 and less than 4.5. For each class, we calculated a linear regression between NDVI and $SRPI_b$ (Figure 8). The mean RMSE is thus decreased to 0.04.

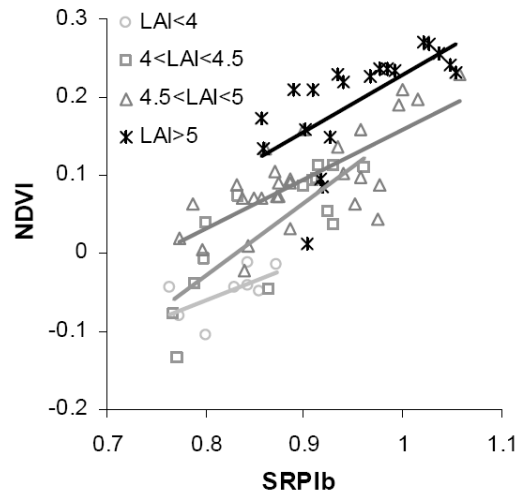


Figure 8: Linear regressions between $SRPI_b$ and NDVI for four LAI classes.

A dummy variable analysis shows that the differences in intercept are highly significant (***), while the slopes of the linear regressions are not significantly different. The result of the intercept test is consistent with the dependence of NDVI on both the $SRPI_b$ (corresponding to leaf colour) and the LAI. The result of the slope test indicates that the proportional decrease of NDVI per $SRPI_b$ unit is constant for all LAI classes.

We used these relationships to correct the NDVI values, according to Equation 6. The correction coefficient C is equal to the mean of the slopes (Figure 8), 0.69. As the nominal value of $SRPI_b$, we chose the maximum $SRPI_b$ value found in the data set, 1.09.

Figure 9 illustrates two examples of classified NDVI (mean NDVI values per plot) before and after the colour correction. Globally, the leaf colour correction tends to increase NDVI values and to decrease the variability within the blocks. The correction is greater for the rainfed treatment, as expected. Between Date 3 and Date 4, the $NDVI_{cor}$ of the irrigated plots does not vary, which is consistent with the stability of the LAI in these plots between these two dates (Figure 5.a). During the same time period, the $NDVI_{cor}$ of the rainfed plots decreases slightly. This result was not expected and may reveal over-correction of the leaf colour.

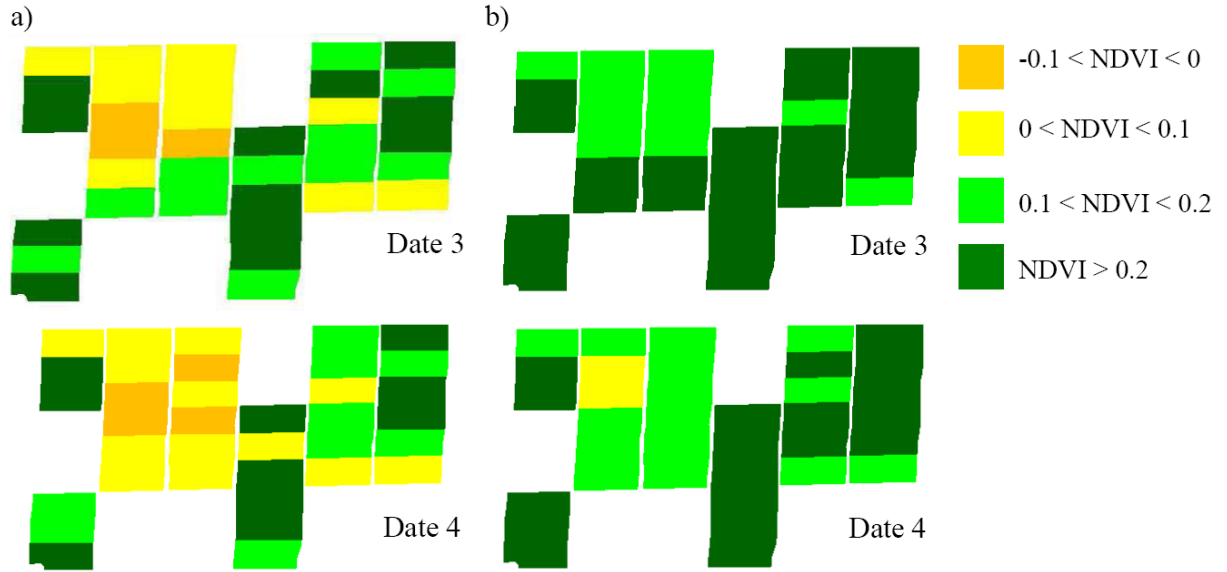


Figure 9: Average NDVI values (a) and average $NDVI_{cor}$ values (b) per plot for two acquisition dates.

Effect of the colour correction on WDI values

Our ground indicator for plant water status was sheath humidity (Figure 5.c). We tested the WDI correction by comparing the strength of the relationship between the sheath humidity data and the WDI before and after correction.

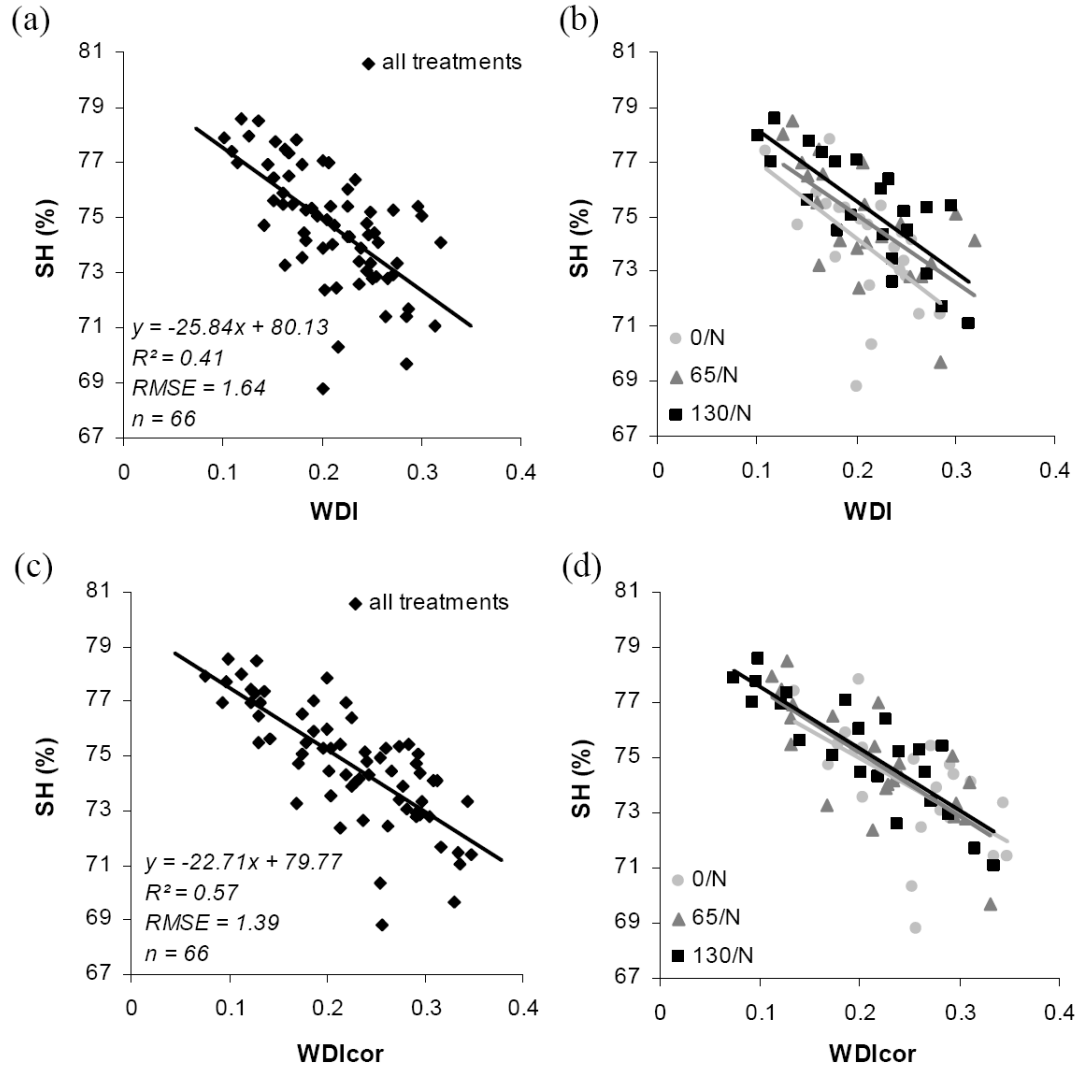


Figure 10: Relationship between sugarcane sheath humidity and water stress index calculated for the complete data set before and after WDI correction [(a) and (c), respectively] and by nitrogen treatment before and after WDI correction [(b) and (d), respectively].

WDI was calculated according to Equation 5, based on the trapezoid between NDVI and ($T_s - T_a$) calculated for each date. The global linear regression between WDI and sheath humidity gives satisfactory results, with a determination coefficient of 0.41 and a RMSE of 1.64%

(Figure 10.a). However, when fitted separately for each nitrogen treatment, the linear regressions between WDI and sheath humidity show some discrepancies (Figure 10.b). We tested the intercepts and slopes of these regressions. The slopes do not differ significantly, but the intercepts of the 130N and 0N treatments are significantly different (**). These results show that WDI reflects not only the water status, but also the nitrogen status of the crop. Thus, it cannot be considered as a robust water stress index in the case of combined stresses. WDI_{cor} was calculated according to Equation 5, based on the trapezoid between $NDVI_{cor}$ and $(T_s - T_a)$ calculated for each date. To test the effectiveness of the colour correction of WDI, we used the same test as for uncorrected WDI, comparing WDI_{cor} values and sheath humidity first globally (Figure 10.c) and then for each nitrogen treatment (Figure 10.c). The global relationship between WDI_{cor} and sheath humidity is stronger than that obtained with uncorrected WDI, with a determination coefficient of 0.57 and a RMSE of 1.39%. When the relationship is determined separately for each treatment, neither the intercepts nor the slopes differ significantly according to the nitrogen treatment. That indicates that WDI_{cor} is sensitive only to water treatment, which confirms our initial hypothesis.

Figure 11 illustrates two examples of classified WDI before and after colour correction. Rainfed plots show higher WDI than irrigated plots (the difference in WDI is greater than 0.1). For irrigated plots, WDI_{cor} values are lower than WDI values. The opposite effect is seen for rainfed plots, which indicates that when water stress occurs, WDI under-estimates the water stress intensity. WDI values are higher than WDI_{cor} values for the 65/N and 130/N treatments, while the opposite effect is observed for the 0/N treatment. This shows that WDI under-estimates crop water stress in the presence of nitrogen deficiency. Between the two dates, a small increase in water stress (because of the occurrence of a dry period) can be seen (0.015 for the irrigated treatment and 0.04 for the rainfed treatment).

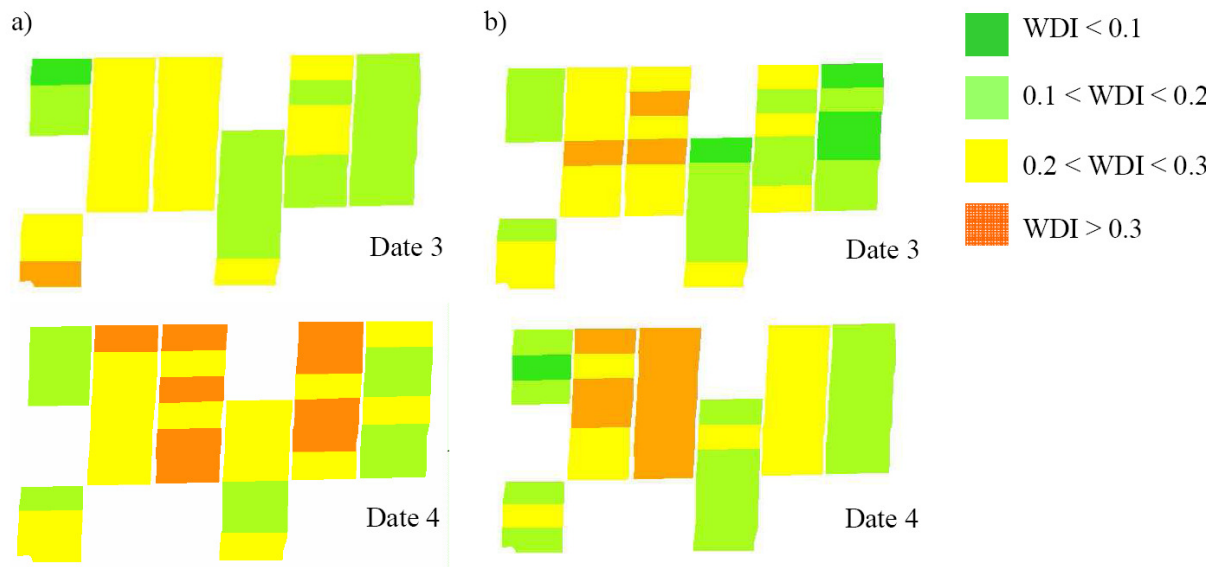


Figure 11: Average WDI values (a) and average WDI_{cor} values (b) per plot for two acquisition dates.

The effect of nitrogen input on WDI has been observed in studies on wheat crops (Tilling et al. 2007). Another study in broccoli crops (El-Shikha et al. 2007) did not find a nitrogen effect, but a closer examination of that data set shows that there was no variation in leaf colour during the experiment. In that experiment, nitrogen affected only the LAI of the broccoli crop, which is taken into account in the calculation of WDI.

4. Conclusion

In this paper, we test the hypothesis that the VIT approach is affected by the nitrogen status of the crop through under-estimation of the crop cover (because of diminished NDVI values due to yellowing leaves). The effect of nitrogen deficiency on NDVI results in a false indication that the vegetation cover is lower than it is in the field. This false indication leads to under-estimation of water stress using the WDI.

We first show that the $SRPI_b$ vegetation index can be used as an indicator of the greenness of the leaves, whatever the LAI of the canopy may be. Leaf colour is a robust indicator of the nitrogen status of the crop; low $SRPI_b$ can be linked to nitrogen deficiency, whatever the origin of the deficiency (limited water or limited nitrogen). Once the nitrogen status of the crop is identified, the $SRPI_b$ index can be used to normalise NDVI values to a reference of equivalent “green leaves” NDVI. This correction could also be performed using SPAD reference value. This normalisation is derived from the unique relationship between NDVI and the $SRPI_b$ for a given range of LAI. We then use this colour-corrected NDVI to determine new limits of the trapezoid for the WDI calculation. The use of corrected NDVI compared to uncorrected NDVI significantly improves the relationship found between sheath humidity, an indicator of plant water status, and WDI for the different treatments.

This study has some experimental limitations. First, data collection began late in the growing season, and the canopy was almost closed. Thus, the range of LAI values is not very large. The NDVI correction procedure should be tested on a data set with greater variation in the vegetative cover fraction. Second, the biological and radiometric measurements could not be performed simultaneously. The interpolation of the biological data induces errors that are difficult to quantify; these interpolation errors are added to effects due to the timing of responses in the different parameters we compared. NDVI and SPAD values are directly correlated, and thus directly comparable, if there are no interpolation errors. Thus, the sheath humidity of the plant is an indirect indicator of the water availability in the soil with an undetermined lag in response time, while WDI indicates the instantaneous response of the plant to insufficient water availability.

In spite of these limitations, this experiment has produced interesting results. Importantly, our study was designed to explore the difficult challenge of combined stress diagnosis and quantification by remote sensing. Our results will be strengthened by additional research that takes into account the limitations previously cited.

Opportunities exist to use airborne multispectral (visible, infrared, thermal infrared) data collection to detect spatial variation in crop nitrogen and water status. In sugarcane crops, seasonally variable conditions such as water status must be determined frequently during the growing cycle in order to provide the right amount of water to the crop. Traditional methods assume the soil properties of the field to be homogeneous. Indices designed to measure canopy-level N or water status using remotely sensed data can thus provide additional spatial information. The aerial measurements presented in this paper may be used to delimit management zones within the fields and to facilitate the spatial and temporal matching of N supply to water availability.

Acknowledgments

The authors thank Michel Jeanette, Lilian Gauvin, Dany Deurveilher, Ludovic Robert and Emmanuel Hoarau for their assistance with the experimental design and field measurements. This work was supported by the French Ministry of Agriculture (AgriDrone project) and the Reunion Region (V. Lebourgeois fellowship).

References

- Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., Colaizzi, P.D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H., & Moran, M.S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In 5th International Conference on Precision Agriculture,
- Carter, G.A., & Miller, R.L. (1994). Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive wavebands. *Remote Sensing of Environment*, 50, 295-302
- Chappelle, E.W., Kim, M.S., & McMurtrey Iii, J.E. (1992). Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing of Environment*, 39, 239-247
- Clarke, T.R. (1997). An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. *Horticulture Technology*, 7, 9-16

- El-Shikha, D.M., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., & Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92, 183-193
- Fois, S., Motzo, R., & Giunta, F. (2009). The effect of nitrogenous fertiliser application on leaf traits in durum wheat in relation to grain yield and development. *Field Crops Research*, 110, 69-75
- Gascho, G.J. (1985). Water - sugarcane relationships. *Sugar Journal*, 48, 11-17
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., & Strachan, I.B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352
- Idso, S.B. (1982). Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59-70
- Idso, S.B., & Baker, D.G. (1967). Relative importance of reradiation, convection and transpiration in heat transfer from plants. *Plant Physiology*, 42, 631-640
- Ingram, K.T., & Hilton, H.W. (1986). Nitrogen - potassium fertilization and soil moisture effects on growth and development of drip irrigated sugarcane. *Crop Science*, 26, 1034-1039
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., & Pinter, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 17, 1133-1138
- Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilve, H., & Frangi, J.P. (2000). Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and inverse mode. *Remote Sensing of Environment*, 74, 417-481
- Jimenez-Munoz, J.C., & Sobrino, J.A. (2006). Error sources on the land surface temperature retrieved from thermal infrared single channel remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 999-1014
- Koenker, R. (2008). quantreg: Quantile Regression. R package version 4.17. In
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Mallavan, B., Prévot, L., & Roux, B. (2008a). Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test. *Sensors*, 8, 7300-7322

- Lebourgeois, V., Labbé, S., Bégue, A., & Jacob, F. (2008b). Atmospheric corrections of low altitude thermal airborne images acquired over a tropical cropped area. In IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Boston, Massachusetts (USA), 6 - 11 July, 4p.
- Lelong, C., Burger, P., Jubelin, G., Roux, B., Labbé, S., & Baret, F. (2008). Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for quantitative Monitoring o Wheat Crop in Small Plots. *Sensors*, 8, 3557-3585
- Moran, M.S. (2000). Image-based remote sensing for agricultural management - Perspectives of image providers, research scientists and users. In 2nd International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Orlando, Florida (USA), 10-12 January, 23-30
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 46, 246-263
- Moran, M.S., Fitzgerald, G., Rango, A., Walthall, C., Barnes, E., Bausch, W., Clarke, T., Daughtry, C., Everitt, J., Escobar, D., Hatfield, J., Havstad, K., Jackson, T., Kitchen, N., Kustas, W., McGuire, M., Pinter Jr., P., Sudduth, K., Schepers, J., Schugge, T., Starks, P.L., & Upchurch, D. (2003). Sensor development and radiometric correction for agricultural applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 705-718
- Moran, M.S., Inoue, Y., & Barnes, E.M. (1997). Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61, 319-346
- Penuelas, J., Baret, F., & Filella, I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31, 221-230
- Penuelas, J., & Filella, I. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 3, 151-156
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., & Field, C.B. (1994). Reflectance Indices Associated with Physiological Changes in Nitrogen- and Water-Limited Sunflower Leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135-146
- Penuelas, J., Gamon, J.A., Griffin, K.L., & Field, C.B. (1993). Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 46, 110-118

- Pinter Jr., P., Hatfield, J., Schepers, J., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T., & Upchurch, D.R. (2003). Remote Sensing for Crop Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, 647–664
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, 309-317
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79, 213-224
- Tilling, A.K., O'Leary, G.J., Ferwerda, J.G., Jones, S.D., Fitzgerald, G.J., Rodriguez, D., & Belford, R. (2007). Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Research*, 104, 77-85
- Wiedenfeld, R.P. (1995). Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. *Field Crops Research*, 43, 101-108
- Wu, J., Wang, D., Rosen, C.J., & Bauer, M.E. (2007). Comparison of petiole nitrate concentrations, SPAD chlorophyll readings and QuickBird satellite imagery in detecting nitrogen status of potato canopies. *Field Crops Research*, 101, 96-103

ARTICLE 4

Toward a combined use of a thermal infrared water stress index and water balance modelling for irrigation monitoring on sugarcane crop

Soumis en Février 2009 à "Agricultural Water Management"

Toward a combined use of a thermal infrared index and water balance modelling for monitoring sugarcane irrigation

Lebourgeois, V.¹, Chopart, J-L.², Bégué, A.³, Le Mézo, L.²

¹ CIRAD UPR SCA, Station La Bretagne, Saint-Denis, La Réunion, F-97408 France - valentine.lebourgeois@cirad.fr

² CIRAD UPR SCA, 7 chemin de l'IRAT, 97410 Saint-Pierre, La Réunion, F-97410 France - (jean-louis.chopart; lemezo)@cirad.fr

³ CIRAD UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, Montpellier, F-34093 France - agnes.begue@cirad.fr

Abstract

In humid regions, the timing and quantity of a complementary irrigation regime is challenging because of the irregularity of rainfalls events. In this study, we tested the use of a thermal infrared-derived empirical crop water stress index ($CWSI_e$) as an *in situ* measurement of the water status of sugarcane, to better monitor the irrigation scheduling. To do this, we set up a 2-year experiment in Reunion, on a trial with plots under different water conditions (rainfed and irrigated). Crop surface temperature was measured daily with infrared radiometers (Apogee Instruments) installed above the canopy, and soil moisture and drainage measurements were used to derive the ratio between actual and maximum evapotranspiration (AET/MET) values that were then averaged on “hydricallly homogeneous” time periods (between 7 and 25 days). Only the thermal data acquired on clear days and 1 hour after noon in 2007 were used to define the empirical lower and upper baselines required for the calculation of empirical CWSI. The data set acquired in 2008 was used to test the robustness of the method as we used the upper and lower baselines defined in 2007 to calculate $CWSI_e$. The linear regression between AET/MET and $(1-CWSI_e)$ averaged on the same periods (values ranging between 0.4 and 1) showed a significant correlation for both experimental years ($R^2 = 0.75$ and $RMSE = 0.12$). This result indicates the effectiveness of the $CWSI_e$ to measure the water status of the sugarcane crop, even in humid conditions with a vapor pressure deficit (VPD) between 0.5 and 2.1. We conclude the study by discussing the complementarity of this remote water stress index ($CWSI_e$) with OSIRI, which is the tool currently used in Reunion Island for monitoring sugarcane crop irrigation.

Keywords: Empirical CWSI, irrigation scheduling, water balance, water stress, thermal infrared, sugarcane

Introduction

In many growing regions of the world, including humid regions, sugarcane is cultivated under full or supplementary irrigation. When rainfalls are irregular in time and quantity, the calculation of complementary irrigation amounts to apply, as well as the decision of when to start and stop the irrigation, is not easy to implement. This is the case on Reunion Island, a tropical territory of France that lies in the Indian Ocean. In this region, the high variability of soil types also complicates the use of traditional irrigation scheduling methods. Some of these methods are based on water balance that includes soil measurements that are time consuming and not easy to implement. Other approaches require destructive plant measurements (e.g. leaf water status), or sophisticated equipment (e.g. for sap flow measurements) that present the same inconvenient (Jones, 2004) and provide only local information on the water status of the concerned field. The solution can be found in water balance modelling, as presented by Chopart et al. (2007a, 2007b) who developed OSIRI, a decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments. The tool, currently used in Reunion, is based on a simple water balance simulation model (PROBE) (Chopart and Vauclin, 1990) coupled with a comprehensive set of decisions rules. However, to be totally accurate, water balance modelling needs local soil and root information (Clothier and Green, 1994, Green et al., 2006) and regular updating (like new water balance calculations taking into account actual rainfalls) (Jones, 2004). It is also recommended to check the water status of the crop *in situ*. Consequently, it could be interesting to find a non-destructive and easy way to characterize, *in situ*, the water status of the crop, as a complement to the water balance model.

In the past few decades, new approaches for plant water status sensing have been proposed using infrared thermometry. Canopy temperature has been known for a long time to be linked to the water status of crops (Erlher, 1973; Jackson et al., 1981; Taner, 1963). The interest of the scientific community for the development of water stress indices derived from thermal infrared data is therefore not recent. Many crop water stress indices were developed after the emergence of out-door infrared sensors for measurements of surface temperature, and some of these have been suggested for use in irrigation management including the Stress Degree Day (Idso et al., 1977; Jackson et al., 1977), the Canopy Temperature Variability (Clawson and Blad, 1982) and the Temperature Stress Day (Gardner et al., 1981).

The most successful index is the crop water stress index (CWSI), which takes into account the ambient meteorological conditions also influencing the canopy temperature. The index has been empirically developed by Idso et al. (1981) ($CWSI_e$) and theoretically defined by Jackson et al. (1981) ($CWSI_t$). It corresponds to $(1 - AET/MET)$, where AET is the Actual EvapoTranspiration and MET is the Maximum EvapoTranspiration, and ranges from 0 for a well-watered crop transpiring at the maximum rate, to 1 for a high water-stressed, non irrigated crop. It is restricted to full-canopy conditions, to avoid the influence of viewed soil on the canopy temperature measurements, and has to be calculated under clear sky conditions (Jackson et al., 1981).

The empirical approach ($CWSI_e$) is largely used because it requires only three variables to be applied (vapour pressure deficit, air and canopy temperatures). $CWSI_e$ was presented as an aid for irrigation scheduling on various crops like cotton (Wanjura et al., 1984), corn (Irmak et al., 2000), wheat (Alderfasi and Nielsen, 2001) or soybeans (Nielsen, 1990) with interesting results when applied in arid or semi-arid climates. However, many studies report difficulties encountered in the use of $CWSI_e$ in humid regions where the high humidity and the frequent variations in wind speed and solar radiation can lead to inaccuracies in $CWSI_e$ calculation.

The theoretical method ($CWSI_t$), based on energy balance considerations, appears to be better adapted for humid regions (Keener and Kircher, 1983) as it considers variations in net radiation and wind speed. However, these variables, as well as the aerodynamic and canopy resistances also required for the $CWSI_t$ calculation, are not always available. This theoretical approach is thus not adapted for operational irrigation scheduling.

To our knowledge, few studies have reported application of CWSI on sugarcane crop for irrigation scheduling, in spite of the fact that sugarcane crop covers the soil during approximately two-thirds of its growing cycle, facilitating the use of such an approach. Boroomand-Nasab et al. (2005) and Khera and Sandhu (1986) used $CWSI_e$ on sugarcane crop, in an arid region, and obtained results that need to be consolidated and tested in humid climate conditions.

Considering the need of a simple and reliable index of sugarcane water status in order to consolidate irrigation scheduling provided by water balance modelling, we set up a 2-year experiment in Reunion with the objective of testing the empirical index $CWSI_e$ as a quantitative index of satisfaction of water requirements for sugarcane crop in the humid region of Reunion Island. We then discussed ways for coupling $CWSI_e$ and OSIRI tool to improve irrigation monitoring of sugarcane in the Island.

The experiment took place in 2007 and 2008 in the south of Reunion Island, where sugarcane fields are irrigated complementary to rainfalls. We followed characteristics of soil water balance, as well as the water status of the crop derived from thermal infrared measurements on a trial with contrasting irrigation conditions (rainfed, and irrigated using OSIRI tool).

Materials and methods

Experiment

The experiment was conducted in 2007 and 2008, in the southern part of Reunion Island (21°32'S, 55°50'E; altitude 250 m), where sugarcane fields are cultivated under irrigation in addition to rainfalls. The region had a tropical climate with a mean annual rainfall of 1007 mm year⁻¹. The trial field was planted with sugarcane (R570 cultivar) with a 1.5 m inter-row and was in the 4th ratoon at the beginning of the 2007 experiment. The measurements began in the 8th month of growth (220 days after the harvest) for each year studied. The soil was clayey, originating from recent volcanic rocks (Cambisol). It was more than 2 m deep and had a dry bulk density close to 1 g cm⁻³. The trial consisted of four plots (15 m by 15 m) with different water treatments (Table 1):

- Two plots with limited water treatment (rainfed). Repetitions of this treatment are referred hereafter as RAIN-1 and RAIN-2 treatments.
- Two plots with two different irrigated treatments (referred hereafter as IRR).

Due to changes in the trial configuration, in 2008 the measurements were only performed on one irrigated treatment instead of two.

Irrigation piloting using OSIRI tool (PROBE model)

The IRR plots were irrigated using a sprinkler system allowing water supply to be as homogeneous as possible. The amount of water was recorded after each irrigation event, which took place at 10:00 p.m. under low wind speed conditions.

The irrigation was piloted using OSIRI (Chopart et al., 2007a). This simple decision-making tool for sustainable individual monitoring of irrigation is based on PROBE soil water balance model (Chopart and Vauclin, 1990). The tool simulates the water balance for irrigation rosters to come, considering the filling rate of soil water storage the day of the simulation, and using statistical expected values of climate factors. Irrigation was triggered when water storage

reached 60 % of the maximum available water storage in the soil. This level was updated for actual rainfalls and irrigations at each new water balance calculation (Table 1):

- In 2007, OSIRI updates were realised at each irrigation roster (corresponding to a five days period) for IRR-1, and each month for IRR-2. The irrigation stopped around 285 days after the harvest (d.a.h.).
- In 2008, the irrigated treatment (IRR-1*) was similar to the IRR-1 protocol up to 292 d.a.h.. Irrigation was then interrupted during a short drying-off period (13 days), and putted on again until 320 d.a.h. in order to test the sensitivity of the $CWSI_e$ to short-term water supply changes.

Experiment year	Treatment	Irrigation ajustement	Irrigation period (d.a.h.) ¹
2007	RAIN-1 and RAIN-2	No irrigation	-
	IRR-1	At each irrigation roster (5 days)	[1 - 286]
	IRR-2	Each month	[1 - 284]
2008	RAIN-1 and RAIN-2	No irrigation	-
	IRR-1*	At each irrigation roster (5 days)	[1 - 292]
			[305 – 320]

¹ days after harvest.

Table 1: Treatments and irrigation scheduling with OSIRI (irrigation decision-making tool) water balance updating.

Environmental and soil measurements

Meteorological data

Meteorological data such as global radiation, air temperature, and relative humidity were measured every 5 seconds, and the mean values were recorded every 5 minutes with a data logger (CR1000, Campbell Scientific). A SP-Lite pyranometer (Kipp & Zonen) was used for

global radiation measurements, and a HMP50 probe (Campbell Scientific) for air temperature and relative humidity recording. The probes and sensors were set up on a mast, 3.5 m above the soil. Rainfalls were also recorded every hour.

Soil moisture, drainage and evapotranspiration

Monitoring of soil moisture was ensured in each plot using TDR (Time-domain reflectometer, Mini-Trase SoilMoisture equip. Corp.) probes located at 7 different depths (at 20, 40, 60, 80, 100, 170, 190 cm). The hydraulic gradient at 1.8 m was obtained for tensiometers at depths 1.7 and 1.9 m. Measurements were recorded approximately weekly.

Two plots (IRR-1, RAIN-1) were also equipped with a free-drained lysimeter of 2.25 m² surface area and 180 cm depth. As described by Chopart et al. (2007a), the lysimeters were carefully filled with soil taken from the surrounding field and packed in such a manner that their properties were as close as possible to each other. The bottom was equipped with an automatic water outflow measuring device. In 2004, a sugarcane row was planted in each lysimeter in such a way that plant density was the same as that of the surrounding field. Experimental plots of block 2 (IRR-2, RAIN-2) were not equipped with lysimeters. Consequently, as the soil and the crop are assumed to be homogeneous, for the calculation of AET/MET, we considered the drainage to be the same as for repetition 1.

The actual evapotranspiration (AET) was measured from the following equation:

$$\Delta S = R + I - AET - D \quad (1)$$

where, ΔS is the variation of soil water storage (S) between two consecutive TDR measurements of S, D is the drainage at 1.8 m estimated from Darcy's Law, R is the effective rainfall and I the irrigation. In case of a high rainfall and high drainage, when it is difficult to measure D with Darcy's Law, we used D measured in the lysimeters.

The maximum evapotranspiration (MET) was calculated from the climatic potential evapotranspiration (PET) and the crop coefficient (Allen et al., 1998).

Sugarcane surface temperature measurements

Measurements of surface temperatures were performed continuously on each experimental plot (Table 1).

We used four thermal infrared sensors (IRR-P infrared radiometer, Apogee Instruments Inc.), characterized by a [8 - 14] μm spectral sensitivity, a 22° half angle, and a response time less than 1 s. The sensors viewed the canopy, centred on the row, at vertical mode at 7 m above the soil. The system provided a circular footprint diameter of approximately 2.8 m at canopy level for a sugarcane height of 3.5 m. Surface temperatures were sampled every 5 s and the mean values were calculated and recorded every 5 minutes with a data logger (CR1000, Campbell Scientific).

The four thermal infrared thermometers were calibrated against a blackbody for temperatures ranging from 20 to 40°C . A linear correction function was calculated for each sensor (Table 2), and applied to the surface temperatures acquired by the different sensors throughout the experiment. The 2°C drift for surface temperatures around 40°C of the IrrP82 sensor (Table 2) points out the need for sensor calibration.

Sensor	Slope	Intercept	R ²	RMSE ^a
IrrP39	1.01	-0.58	0.99***	0.19
IrrP40	0.95	1.08	0.99***	0.67
IrrP82	0.91	1.94	0.99***	1.09
IrrP83	0.95	1.03	0.99***	0.65

^a Root Mean Square Error

Table 2: Calibration results for the four thermal infrared Apogee sensors used in the experiment against a blackbody reference.

Empirical calculation of CWSI

The empirical form of the crop water stress index (CWSI_e) is based on the linear relationship that exists, during the day and under clear sky conditions, between canopy minus air temperature ($T_c - T_a$) and vapour pressure deficit (VPD) of the air for a crop well-supplied with water and transpiring at a potential rate (Idso et al., 1981). CWSI_e requires the determination of two baselines that are specific for each crop (Idso, 1982) and agroclimatic zone (Gardner et al., 1992a; Nielsen, 1990). The lower baseline (ll) represents the “non-water-

stressed baseline”, which is VPD dependent, and the upper baseline (ul) represents $(T_c - T_a)$ for a canopy with no transpiration and is VPD independent.

The crop water stress index is then defined by (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981) as :

$$CWSI_e = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_l}{(T_c - T_a)_u - (T_c - T_a)_l} \quad (2)$$

where $(T_c - T_a)_m$ is the measured difference between canopy and air temperature.

We defined the lower and upper baselines using the 2007 experiment and used them for the calculation of $CWSI_e$ through the 2008 experiment in order to test robustness under different meteorological conditions.

Determination of the lower baseline

Two methods can be used to experimentally determine the non-water-stressed baseline. The first method is based on a diurnal study of a well-watered crop; $(T_c - T_a)$ and VPD are recorded throughout a single day, from about 10 a.m. to 4 p.m., in order to obtain a wide range of $(T_c - T_a)$ and VPD values. However, with this method, seasonal crop changes in canopy structure, transpiration rate and environmental variations, particularly in VPD, are not represented in the data (Gardner et al., 1992b). Furthermore, the method is not applicable in humid climates where the daily VPD range is too narrow to determine an equation.

The second method consists of collecting $(T_c - T_a)$ and VPD on a well-watered crop at a given time of the day for several dates throughout the growing season (Gardner et al. 1992a). Measurements are generally made one to two hours after solar noon, corresponding to the period of the day for which VPD as well as water stress is maximum.

In order to determine the non-water stressed baseline equation, we calculated, for IRR treatments, the mean of $(T_c - T_a)$ and VPD between 1:30 and 2:00 p.m., corresponding to the period of the day for which the evapotranspiration is at a maximum rate. We excluded the cloudy days by thresholding values of global radiation, and only kept the days following an irrigation watering or a rainfall event during the irrigation period.

Determination of the upper baseline

The upper baseline represents a crop presenting no transpiration and has to be determined on field observations of a crop under extreme water stress. Consequently, this baseline was determined on a RAIN treatment, during the driest period of the 2007 experiment.

Results

This section first presents the environmental and water conditions of the 2007 and 2008 experiments. We then focus on the 2007 experiment, which served for the determination of the upper and lower baselines, and compare the $CWSI_e$ values to AET/MET in 2007 and 2008.

Environmental and water conditions

Environmental conditions during the 2007 experiment

Fig. 1 summarizes the evolution of the main climatic factors during the 2007 experiment and shows a high variability in potential evapotranspiration (PET) from day to day, which is a characteristic of the region. A global increase of PET values can be noted between 220 and 332 d.a.h., which corresponds to the transition from a dry and cool season to a rainy and hotter season with longer days. Daily values of vapour pressure deficit, calculated as the mean of VPD between 13:30 and 14:00, also fluctuated greatly due to humidity and cloud cover variations. However, the range of observed VPD, approximately [0.5 – 2.1], was very low through the 5-month duration of the experiment. The high natural variability of rainfalls (Fig. 1) resulted in a variable irrigation schedule for IRR treatments. These climatic and irrigation characteristics led to a high variability in the water supply conditions of the crop, with periods showing an over-supply of water compared to actual crop needs, and periods presenting a water deficit.

The water balance calculation based on soil humidity and tensiometer measurements were done approximately every week, but with some variations due to rainfalls and meteorological constraints. It was thus not possible to monitor AET/MET each day, which would not have been relevant because differences in soil humidity from day to day are lower than the measurements precision. These comments are also valuable for drainage measurements in the lysimeters. Consequently, the *in situ* measurements of AET/MET were given by grouping the data by phases of 7 to 25 days, according to the variability of climatic conditions and acquisition dates. These phases correspond to the seven phases mentioned in Fig. 1:

- p1 (220-234 d.a.h.): following a rainy period, this phase was relatively dry, with a low PET;
- p2 (235-253 d.a.h.): rainy period with high drainage ($> 11 \text{ mm day}^{-1}$);

- p3 (254-268 d.a.h.): intermediate period characterised by low rainfalls but full water storages and a non-negligible drainage;
- p4 (269-283 d.a.h.): beginning of the dry season, with irrigation of IRR treatments;
- p5 (284-310 d.a.h.): beginning of the sugarcane drying-off period with irrigation stopped for IRR treatments, and the appearance of a water stress on RAIN treatments;
- p6 (311-318 d.a.h.): water stress;
- p7 (319-332 d.a.h.): limitation of the water stress due to some low rainfalls at the end of the previous phase.

These seven phases were used for the comparison between AET/MET and the thermal infrared derived water stress index (1-CWSI_e) which was calculated on clear days (Fig. 1).

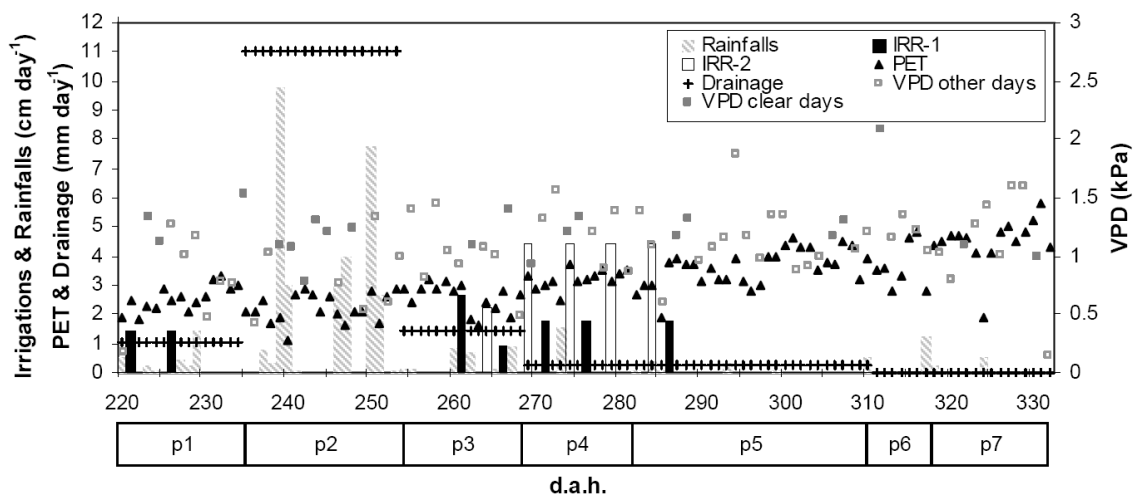


Fig. 1. Environmental and water conditions measured during the 2007 experiment (d.a.h.: days after harvest). Daily Vapour Pressure Deficit (VPD) values represent the mean VPD measured between 1:30 and 2:00 p.m. Daily drainage values correspond to a mean value per phase. (PET: Potential evapotranspiration, IRR: irrigated, RAIN: rainfed)

Environmental conditions during the 2008 experiment

Fig. 2 presents the 2008 climatic conditions. The experiment has been divided in six phases following the frequency of the AET measurements and climatic conditions.

At the beginning of the 2008 experiment, the phases p1 (223-253 d.a.h) and p3 (268-287 d.a.h.) were wet, with frequent rainfall resulting up to the point of drainage. The phase p2 (254-267 d.a.h.) was moderately dry. During these three phases, IRR-1* treatment received only two irrigations.

Phases p4 (288-307 d.a.h) to p6 (351-362 d.a.h.) were drier, without consequent rainfalls. IRR-1* treatment received irrigations during p5 (308-321 d.a.h.) due to a change in the irrigation scheme. The interruption between the phases p5 and p6 is due to the meteorological conditions that did not allow the $CWSI_e$ calculation (only one date with clear conditions between 1:30 and 2:00 p.m.).

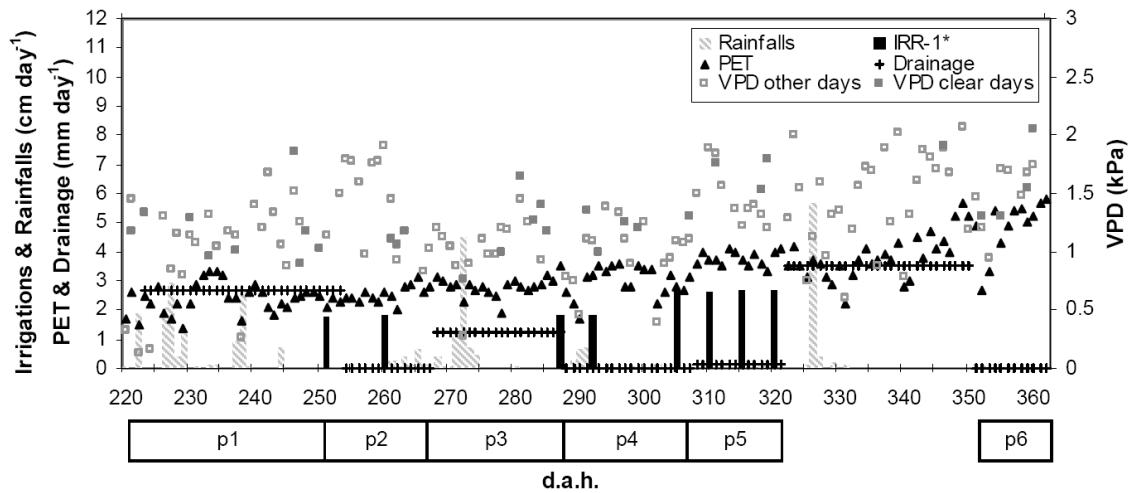


Fig. 2. Environmental and water conditions measured during the 2008 experiment (d.a.h.: days after harvest). Daily Vapour Pressure Deficit (VPD) values represent the mean VPD measured between 1:30 and 2:00 p.m. Daily drainage values correspond to a mean value per phase. (PET: Potential evapotranspiration, IRR: irrigated, RAIN: rainfed)

Water conditions: AET/MET characterization through soil measurements

Fig. 3 shows the temporal evolution of AET/MET for each treatment. Values were calculated over the previously defined phases.

In 2007 (Fig. 3a), the water conditions were very varying with a general decrease of AET/MET from 1 to 0.2. From p1 to p3, because of frequent rainfalls, AET of all the treatments were close to MET, indicating well-watered crops. After a transition phase (p4), AET decreased for all the treatments due to a dry period, coupled with the end of the irrigation in IRR treatments. This decrease was faster and more pronounced for RAIN treatments and reflected a higher water stress.

In 2008 (Fig. 3b), AET/MET also showed a general decrease through time, but with a smaller range than in 2007 (from 1 to 0.3). AET/MET of all treatments stayed close to 1 from p1 to p3. Drier phases p4 and p5 resulted in a rapid decrease of AET/MET of RAIN treatments,

down to 0.3. In p4, IRR-1* treatment also suffered from the stoppage of irrigation, but showed a new increase of AET/MET in p5 due to a restart of irrigation.

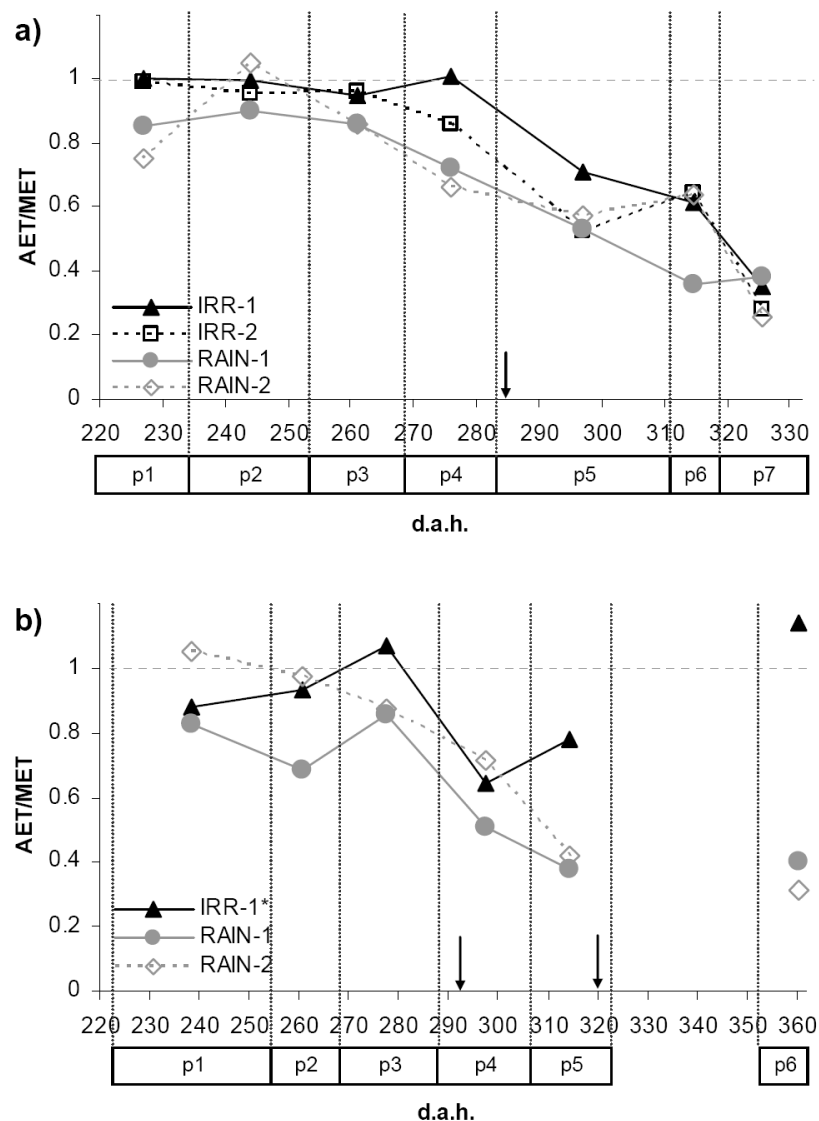


Fig. 3. Ratio between actual and maximum evapotranspiration (AET/MET) on irrigated (IRR, black lines) and rainfed (RAIN, grey lines) treatments during the 2007 (a) and 2008 (b) experiments (d.a.h.: days after harvest). The black arrows indicate the end of irrigation.

The $CWSI_e$

Lower and upper baselines equations

We present here the upper and lower baseline equations obtained during the 2007 experiment (Fig. 4).

We defined the lower baseline using the measurements made on IRR-2 plot as it seems to have the lowest stressed canopy. Indeed, the IRR-2 treatment presented the minimum ($T_c - T_a$) values, with mean values 0.3°C lower than the ($T_c - T_a$) values of the IRR-1 treatment. Due to frequent intermittent cloud cover, only eight dates were used to obtain the following equation (Fig. 4):

$$(T_c - T_a) = -1.77 \text{ VPD} + 2.33 \quad (3)$$

with $R^2 = 0.67$ ($n = 8$), and where ($T_c - T_a$) ($^\circ\text{C}$) and VPD (kPa) are mean values of the measurements observed between 1:30 and 2:00 p.m..

During the experiment the highest water stress occurred on October 10th, on RAIN-1 plot. The upper baseline was thus fixed at 3.8°C , corresponding to the ($T_c - T_a$) value measured on that day (Fig. 4).

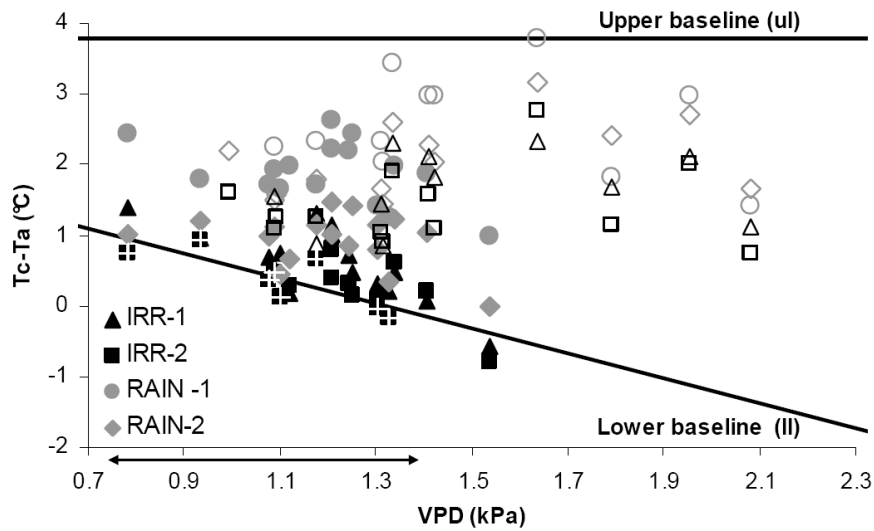


Fig. 4. Mean values of canopy minus air temperature ($T_c - T_a$) and Vapour Pressure Deficit (VPD) acquired between 1:30 and 2:00 p.m. for the four treatments on clear days during the 2007 experiment. Open symbols represent the data acquired after the stoppage of irrigation. The double black arrow indicates the VPD range used for the lower baseline definition. The white crosses indicate the IRR-2 points used for the lower baseline calculation.

Evolution of the daily ($1 - \text{CWSI}_e$) during the 2007 and 2008 experiment

Temporal evolutions of daily ($1 - \text{CWSI}_e$) for all the treatments are given in Fig. 5 for 2007 and 2008. Due to the lower baseline definition method, some CWSI_e exceeded the theoretical lower bound ($= 0$), making ($1 - \text{CWSI}_e$) a little higher than 1.0, but not enough to invalidate the

lower baseline equation. For both years, the choice of calculation dates of $CWSI_e$ (30 dates in 2007, 26 dates in 2008) was done based on the cloud coverage.

In 2007, the evolution of $(1-CWSI_e)$ shows a global decrease over time, with a high amplitude going from 1.0 to 0.0 (Fig. 5a). Whatever the phase, values of $(1-CWSI_e)$ were always lower for RAIN treatments compared to IRR treatments, indicating a higher water stress, especially for the RAIN-1 plot. For RAIN-1, values of $(1-CWSI_e)$ were not available from p2 to p3 because in situ plant measurements were carried out under the temperature sensors simultaneously with the data acquisition, and perturbed the signal. IRR-1 and RAIN-1 also do not present $1-CWSI_e$ values for p1 due to a later set-up of the sensors, and for p6 due to data logger dysfunction during a short time.

In 2008, $CWSI_e$ was computed using the lower and upper baselines defined during the 2007 experiment. A global decrease of $(1-CWSI_e)$ over time was also noted but lower differences were observed between RAIN and IRR treatments due to frequent rainfalls, except during the p5 phase (Fig. 5b). During the last period (p6), crop lodging occurred on the IRR-1* treatment due to high biomass and wet conditions, making the surface temperature measurements and thus $CWSI_e$ calculation inaccurate.

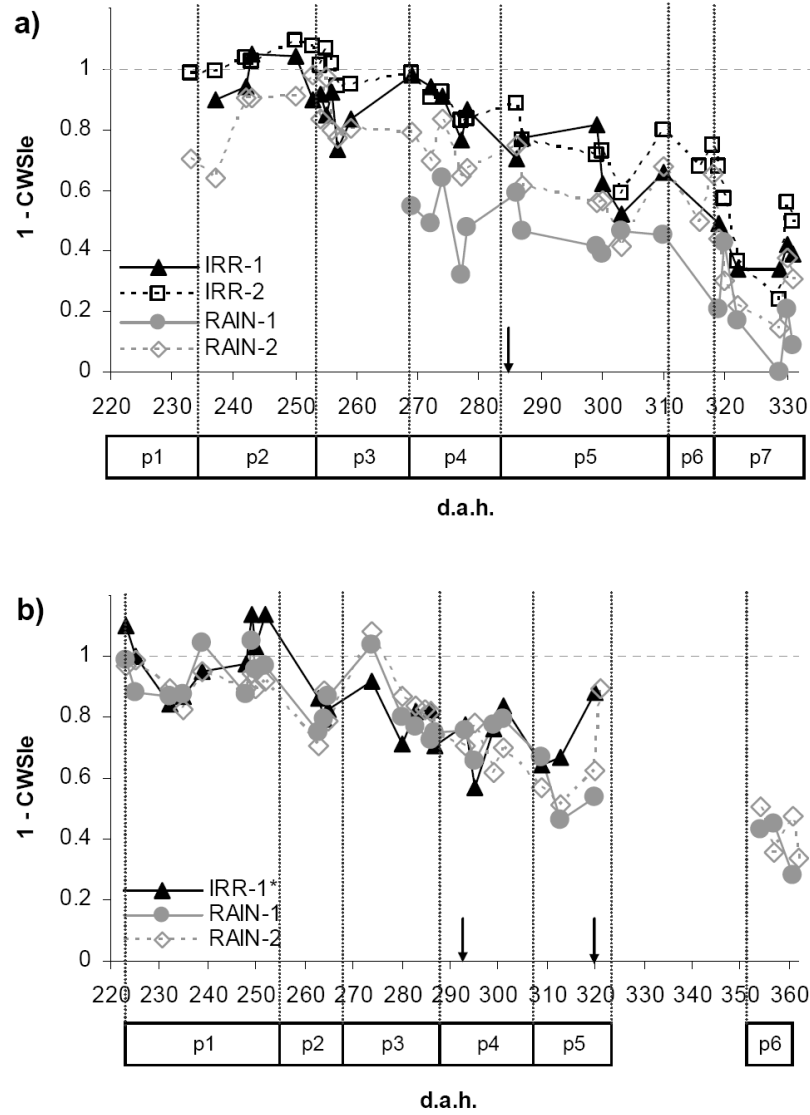


Fig. 5. Temporal evolution of daily (1-CWSI_e) values (Empirical Crop Water Stress Index) on rainfed (RAIN) and irrigated (IRR) treatments during the (a) 2007 and (b) 2008 experiments (d.a.h.: days after harvest). The black arrows indicate the end of irrigation.

Relationship between (1-CWSI_e) and AET/MET

Relationships established from the 2007 and 2008 data sets showed a good agreement between (1-CWSI_e) and AET/MET (Fig. 6).

In order to compare (1-CWSI_e) and AET/MET, (1-CWSI_e) were averaged for each period of the 2007 and 2008 experiments, and a linear regression was fitted. The linear regressions measures are presented for 2007, 2008, and for both years in Table 3. Results showed a significant correlation between the variables.

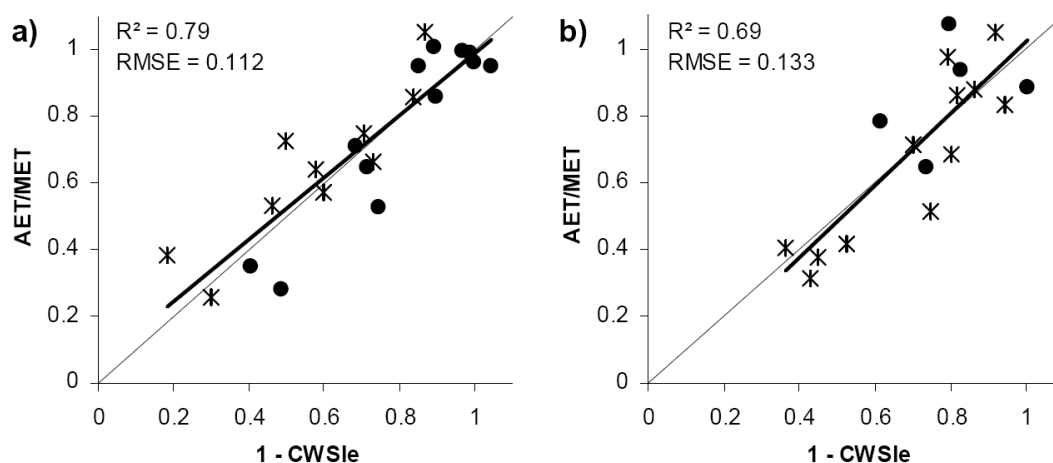


Fig. 6. Linear regression between (1-CWSI_e) values (CWSI_e: Empirical Crop Water Stress Index) and Ratio between actual and maximum evapotranspiration (AET/MET) for (a) the four plots during the 2007 experiment, and (b) the three plots during the 2008 experiment. Crosses and circles represent rainfed and irrigated treatments, respectively.

Year	<i>n</i>	Slope	Intercept	R ²	MB ^a	NE ^b	RMSE ^c
2007	22	0.935	0.057	0.79***	-1.1	0.79	0.112
2008	17	1.078	-0.057	0.69***	0.1	0.68	0.133
2007 & 2008	39	0.979	0.021	0.75***	-0.6	0.74	0.122

^a Mean bias (%); ^b Nash Efficiency coefficient; ^c Root Mean Square Error

Table 3: Summary measures of the linear regressions calculated between (1-CWSI_e) and AET/MET for the 2007 and 2008 experiments.

Discussion

On the capacity of CWSI_e to estimate AET/MET

In the experimental conditions, our results showed a good agreement between the thermal infrared water stress index and the ground observations of the crop water status given by the

AET/MET ratio. The 2008 experiment was used as a test of the robustness of the $CWSI_e$ calculation method, as we used the upper and lower baselines defined in 2007 for the 2008 $CWSI_e$ calculation. The significant correlation between AET/MET and $(1-CWSI_e)$ for both experimental years encourages the use of $CWSI_e$ as an index of sugarcane crop water status in the area.

Although the literature mentions the difficulties in the determination of the lower baseline in humid regions because of the narrow range of VPD, we were able to define a baseline with R^2 equal to 0.67. According to Gardner et al. (1992b), this coefficient of determination is typical of baseline equations defined using data acquired during part of the growing season. Furthermore, non-water-stressed baseline should not be used to calculate $CWSI_e$ under VPD conditions outside the range used to define the baseline equation. In our case, the range of VPD observed between 1:30 and 2:00 p.m. on clear days was low during the whole experiment ($[0.75 - 2.1]$), and exceeded by only 0.7 kPa the upper value of the range of VPD used for the lower baseline definition ($[0.75 - 1.4]$). Outside of this range of VPD values, the points were still contained or were very close to the space between the upper and the lower bounds defined in 2007, so we considered the $CWSI_e$ calculation as validated.

One possible limitation of this approach for irrigation monitoring applications is that it can not be used in the early growing season, when plants are small and soil can be viewed by the thermal infrared sensor (Jackson et al., 1981). For the early growing season, it is thus recommended to use the “Vegetation Index / Temperature” concept exposed by Moran et al. (1996) who developed the Water Deficit Index, a thermal infrared derived index adapted to partially covered canopies.

It also might be argued that until now, irrigation scheduling based on canopy temperature measurements have been principally shown as an aid in irrigation timing, but not for the calculation of the amounts of water to be applied per irrigation (Nielsen, 1990). To calculate the amounts of water, the thermal infrared indices should be calibrated, or associated to water balance modelling. This last solution is discussed in the following section.

On the use of $CWSI_e$ to monitor irrigation in real cropping conditions

In this study, we worked on a controlled environment, with a preliminary knowledge of the field soil characteristics that are needed as inputs in OSIRI tool. In farm conditions, these characteristics are rarely known and are thus estimated by the sugarcane growers, or by the agricultural extension officers, leading to possible differences in the irrigation advice. Using

OSIRI tool, the quality of recommendations is also linked to the frequency of new water balance calculations. In Reunion, the updates of water balance are generally not performed by the sugarcane growers as most of them do not own a computer. The updates are thus assisted by agricultural extension officers, which can lead to errors in recommendations if the actual and expected rainfalls are different or if the frequency of the officer visits is low. That is why an optional procedure of direct adjustment by farmers is also proposed (Chopart et al., 2007b; Le Mézo et al., 2007). However, this voluntarily simple procedure is inevitably inaccurate. Considering these limitations, an estimation of the water status of the crop using *in situ* CWSI_e measurements could thus be helpful to (i) readjust the input variables in OSIRI tool (i.e. soil characteristics), in order to provide advice closer to the reality, (ii) assist sugarcane growers in their choices concerning the timing of irrigation after a rainfall event, or (iii) control that the supplied amounts of water are in accordance with OSIRI recommendations. During the experiment, we were able to make the measurements for CWSI_e calculation on approximately 30 % of the days during our experiment, due to the frequent cloudy conditions occurring in the early afternoon. This rate corresponds to one measurement per 3 or 4 days, which is a sufficient frequency to enable the use of CWSI_e as an *in situ* verification of the crop water status. The fact that CWSI_e does not compensate for changes in wind speed or net radiation is not considered here as a limitation if the sampling rules are followed as explained by Gardner et al. (1992b).

We worked here with in-field fixed thermal infrared sensors that were set up with a vertical view in order to avoid azimuthal effects (Fuchs, 1990). However, more research is needed to propose and validate an easier method for canopy temperature measurements in an oblique view, performed with a hand-held thermal infrared radiometer that can be easily done by the sugarcane growers themselves. At the other extreme, the acquisition of thermal data using an airborne imagery camera is also to be investigated. The method is certainly more difficult to set-up, mainly because of the radiometric and geometric corrections of the thermal images (Lebourgeois et al., 2008), but it has the unique advantage of being spatially exhaustive over large areas, allowing a direct comparison between the plots.

Conclusion

Our results demonstrated that CWSI_e was suitable for a quantitative assessment of sugarcane water status in the humid region of Reunion Island. Linear regressions between (1-CWSI_e) and AET/MET in 2007 and 2008 showed a significant correlation, without any bias, and with

a low RMSE. We showed that this empirical approach, optimum in dry environments, could be used in a wet environment with low VPD. The time step (3 or 4 days) associated to the approach makes it suitable for diagnosis of the crop water status, especially for the small-scale growers.

More experiments are needed, however, to test the genericity of the method through time and in other regions of the Island. This step is necessary before developing a combined use of the $CWSI_e$ and water balance modelling for improved monitoring of sugarcane crop irrigation.

Acknowledgments

The authors would like to thank Roland Pirot, Mikael Mézino, Dany Deurveilher, Marion Houllès, Raymond Nativel and Bernard Mouny for their assistance in the experimental design and field measurements. This work was supported by the French Ministry of Agriculture (AgriDrone project) and the Reunion Region (V. Lebourgeois fellowship).

References

- Alderfasi, A.A., Nielsen, D.C., 2001. Use of crop water stress index for monitoring waterstatus and scheduling irrigation in wheat. *Agric. Water Manage.* 47, 69-75.
- Allen, G.A., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Boroomand-Nasab, S., Kashkuli, H.A., Rashid Zadeh, F., 2005. Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference for sugarcane. *Crop Res.* 30, 355-359.
- Chopart, J.L., Vauclin, M., 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 1377–1384.
- Chopart, J.L., Mézino, M., Aure, F., Le Mézo, L., Mété, M., Vauclin, M., 2007a. OSIRI: A simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments. *Agric. Water Manage.* 87, 128-138.
- Chopart, J.L., Aure, F., Le Mézo, L., Mézino, M., Antoir, J., Vauclin, M., 2007b. Field tests of OSIRI, a decision making tool for irrigation of sugarcane farms in Réunion. In: USCID (Ed.), *Proceedings of 4th USCID Int. Conf. on Irrigation and Drainage*, 2-5 oct. 2007, at Sacramento, U.S.A., 423-435.

- Clawson, K.L., Blad, B.L., 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agron. J.* 74, 311-316.
- Clothier, B.E., Green, S.R., 1994. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agric. Water Manage.* 25, 1-12.
- Erlher, W.L., 1973. Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agron. J.* 65, 404-409.
- Fuchs, M., 1990. Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress. *Theor. Appl. Clim.* 42, 253-261.
- Gardner, B.R., Blad, B.L., Garrity, D.P., Watts, D.G., 1981. Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrig. Sci.* 2, 213-224.
- Gardner, B.R., Blad, B.L., Shock, C.C., 1992a. Infrared thermometry and the crop water stress index. I. History, theory, and baselines. *J. Prod. Agr.* 5, 462-466.
- Gardner, B.R., Blad, B.L., Shock, C.C., 1992b. Infrared thermometry and the crop water stress index. II. Sampling procedures and interpretation. *J. Prod. Agr.* 5, 466-475.
- Green S.R., Kirham, M.B., Clothier B.E., 2006. Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigation. *Agric. Water Manage.* 86, 165-176.
- Idso, S.B., 1982. Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27, 59-70.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., 1977. Remote sensing of crop yields. *Science* 196, 19-25.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24, 45-55.
- Irmak, S., Haman, D.Z., Bastug, R., 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agron. J.* 92, 1221-1227.
- Jackson, R.D., Reginato R.J., Idso, S.B., 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Res.* 13, 651-656.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Res.* 17, 1133-1138.
- Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plan-based methods. *J. Exp. Bot.* 55, 2427-2436.
- Keener, M.E., Kircher, P.L., 1983. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. *Agric. Meteorol.* 28, 339-349.

- Khera, K.L., Sandhu, B.S., 1986. Canopy temperature of sugarcane as influenced by irrigation regime. *Agric. Forest Meteorol.* 37, 245-258.
- Lebourgeois, V., Labbé, S., Bégué, A., Jacob, F., 2008. Atmospheric corrections of low altitude thermal airborne images acquired over a tropical cropped area. In: *Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 6-11 July 2008, at Boston, U.S.A., Vol. III, 672-675.
- Le Mézo, L., Aure, F., Mézino, M., Antoir, J., Chopart, J.L., 2007. Module optionnel, intégré dans l'outil de conseil en irrigation OSIRI (MAIA: Module d'Ajustement de l'Irrigation par l'Agriculteur). CIRAD Note (unpubl.), 8 pp.
- Moran, M.S., Rahman, A.F., Washburne, J.C., Goodrich, D.C., Wertz, M.A., Kustas, W.P., 1996. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agric. Forest Meteorol.* 80, 87-109.
- Nielsen, D.C., 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI). *Field Crops Res.* 23, 103-116.
- Taner, C.B., 1963. Plant Temperature. *Agron. J.* 55, 210-211.
- Wanjura, D.F., Kelly, C.A., Wendt, C.W., Hatfield, J.L., 1984. Canopy temperature and water stress of cotton crops with complete and partial ground cover. *Irr. Sci.* 5, 37-46.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Conditions climatiques et variétés cultivées à La Réunion

1. Conditions climatiques et choix variétal à La Réunion

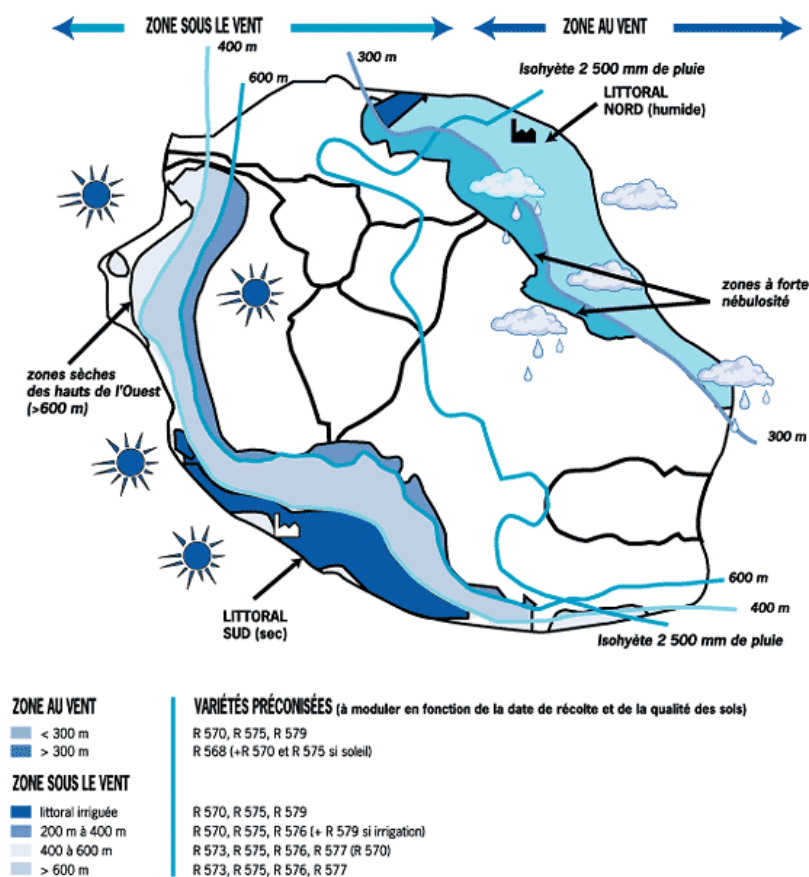


Figure 37 : Variétés préconisées par le Cerf en fonction du zonage climatique réunionnais (Source : Cerf, 2006)

2. Fiche descriptive de la variété R570 (Source : Cerf, www.cerf.re)



R 570



RP 347/67

Libérée en 1978

PARENTE :

H 32/8560 x R 445

Toutes périodes de récolte

Toutes zones sauf altitude :

< 550 m Ouest / Sud

< 300 m dans l'Est

Description botanique :

- Grande canne au tallage abondant et en forme de papier, port érigé, toujours droite même après brûlage. Son aspect général rappelle beaucoup celui de la H 32/8560.
- Feuille large, retombante au 1/3 supérieur de sa longueur, verte ; gaine très adhérente avec de nombreuses tache de Morve Rouge (caractère de R 445), ochréa brun rougeâtre ; auricule triangulaire de taille moyenne, présence de poils à la base ; ligule poilue sur face externe.
- Tige : entre-nœud assez long de diamètre assez gros, cylindrique ; jaune verdâtre, cireuse, présence fréquente de fumagine qui donne un aspect sale à la canne, tavelures ; pas de sillon sur l'oeilleton ; zone radiculaire de largeur constante ; cicatrice foliaire protubérante, œil sphérique, sans poil.
- Fleurit peu ou pas, fleur longue, frêle, hampe florale très longue.

Caractères agronomiques

- Très large zone d'adaptation : zone sèche, irriguée, humide, surhumide, sauf en altitude.
- Présente une certaine sensibilité au Pokkah Boeng qui n'affecte pas pour l'instant son rendement. Légère sensibilité à la Maladie de l'Ananas. Sensibilité observée en Australie à la Maladie de Fidji. Résistante aux autres maladies à la Réunion.
- Rendements forts en général.
- Richesse bonne tout le long de la campagne.
- Bonne tenue en repousses.
- Germe bien, à condition de prélever la semence sur des cannes âgées de 7 à 9 mois. Traitement fongicide des boutures indispensable.
- La forte adhérence des gaines rend l'épillage des boutures difficile, c'est une source de propagation des cochenilles à la plantation.
- Cette variété a aujourd'hui la faveur des planteurs de l'île. Elle a supplanté les autres variétés dans les nouvelles plantations.
- Se comporte très bien à la récolte mécanique, à signaler cependant une certaine dureté de l'écorce qui nécessite un affûtage fréquent des couteaux des récolteuses.

3. Fiche descriptive de la variété R579 (Source : Cerf, www.cerf.re)



R 579



R 81/0970

Libérée en 1993

PARENTÉ :

PR 1028 x N 8

Milieu – fin de campagne
régions littorales humides
ou irriguées

Description botanique :

- Feuilles larges, dressées, vert foncé.
- Gaine violet foncé très peu adhérente : se dépaille très facilement ; léger duvet sur gaines jeunes.
- Ochréa foncé, auricule triangulaire qui se détache très vite sur les gaines en phase d'assèchement.
- Tiges très droites, port dressé, diamètre assez gros ; de couleur rosé à mauve-violet foncé ; tallage moyen.
- Entre-nœuds en général assez longs mais parfois irréguliers et raccourcis (marque la sécheresse) ; de forme très cylindrique ; présence de cire sur la partie supérieure ; peu de craquelures, quelques tavelures.
- Œilleton plat, de forme triangulaire, suivi d'un sillon prononcé sur la moitié de l'entre-nœud.
- Anneau de croissance régulier de couleur identique à celle de l'entre-nœud.
- Très faible floraison en conditions normales.

Caractères agronomiques

- Forts rendements en canne dans les zones de basse altitude et humide (Nord/Est et Est) et sous irrigation : sa plantation est à proscrire dans les zones sèches ou froides.
- Tiges très lourdes et denses ; germination moyenne en vierge mais repousse très vigoureuse et croissance rapide avec la pluie ou l'irrigation.
- Tallage moyen : la souche demande un soin particulier vis à vis des mauvaises herbes. Le tallage s'amplifie avec les repousses.
- L'aspect droit très régulier et l'épillage naturel en font une variété qui devrait plaire aux agriculteurs : coupe manuelle et chargement faciles, et bonne adaptation à la mécanisation ; il reste à préciser par l'expérience sa résistance au piétinement des engins.
- Richesse moyenne à forte en milieu et fin de campagne : (ne fleurit pas).
- Pas de sensibilité aux maladies graves à la Réunion ; on a pu observer quelques stries chlorotiques dans des conditions très humides et de sols gorgés d'eau.
- Variété assez sensible au cyclone (casse au niveau de l'apex, sans doute le défaut lié à son "épillage facile").

ANNEXE 2 : Lettre du Syndicat des Fabricants de Sucre de La Réunion

SYNDICAT DES
FABRICANTS DE SUCRE
DE LA RÉUNION

SIRET 318 490 620 00016
SIÈGE SOCIAL : 40, route Gabriel Macé - 97490 SAINTE-CLOTILDE
ADRESSE POSTALE : BP 53 La Mare - 97438 SAINTE-MARIE
tél 02 62 72 18 00 - fax 02 62 72 18 01 - e-mail info@sfsram.com
DÉLÉGATION METROPOLE : 1 bis rue Voltaire - BP 40112 - 44001 NANTES Cedex 1
tél 02 40 73 44 12 - fax 02 40 73 24 17 - e-mail matthieu.bolet@wanadoo.fr

CIRAD
La Bretagne
BP 20
97408 SAINT DENIS MESSAG Cedex 9

A l'attention de M. le Délégué Régional

Sainte Marie, le 13 octobre 2006

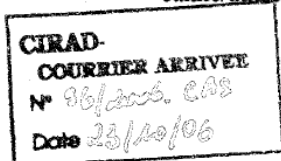
Objet : Programmation de la recherche CIRAD 2007/2014

Monsieur le Délégué Régional,

Le CIRAD représente pour la Réunion une chance unique de constituer des programmes de recherches de niveau mondial malgré la dimension modeste de la production réunionnaise dans le contexte international. Il peut et doit être à ce titre, un partenaire essentiel du Plan de Modernisation de la filière canne et, à plus long terme, de l'adaptation de cette filière aux conditions économiques, sociales et environnementales qui prévaudront à l'horizon 2020.

Pour occuper la place qui doit être la sienne dans ce plan de modernisation et de développement, le CIRAD devrait, selon nous, privilégier les orientations suivantes :

- Poursuivre et ajuster les programmes engagés (cf lettre SFS du 03 nov 2003) tout en élaborant des propositions d'évolution structurelle de la filière et des programmes de recherche associés, pour accompagner l'adaptation de la filière à l'évolution du contexte local et international ;
- Recentrer les axes de recherche sur les attentes locales, en s'inspirant de l'extérieur et en affichant la réunion comme laboratoire (diversité...) base de l'exportation ultérieure du savoir – faire développé ;
- Prioriser la recherche appliquée proche du développement, avec des objectifs quantifiés dans la mesure du possible ;
- Renforcer le maillon assurant le lien recherche appliquée – développement par la mise en place d'une interface assurant la déclinaison des produits de la recherche appliquée en outils de développement opérationnels ;
- Renforcer le partenariat et la complémentarité avec le CERF ;
- Rechercher et développer les axes de recherche renforçant les complémentarités filière canne/autres filières agricoles et filière canne/environnement.



Voici les enjeux majeurs sur lesquels le CIRAD pourrait, selon nous, apporter sa contribution par l'orientation de son programme de recherche appliquée :

- Diminution des coûts de production planteurs : objectif – 20% d'ici 2015
 - i. Simplification de l'itinéraire technique , plantes de couverture (enherbement et fertilité du sol), rotations maraîchage
 - ii. Atteindre 50 % de coupe mécanique d'ici 2015
 - iii. Augmentation de l'efficience de l'eau (Kg MS canne / m3) et gestion de la pénurie en eau
- Accélérer le rythme de progression des rendements = objectif passer de + 0,5 Tc/ha/an actuel à + 1 Tc/ha/an en 2015
 - i. Identifier les axes prioritaires qui permettront l'accroissement des rendements en canne et en sucre dans les meilleures conditions économiques
 - ii. Appui au CERF pour la sélection variétale
 - iii. Adaptation du référentiel désherbage et fertilisation
 - iv. Meilleure valorisation des différentes ressources de matière organique
- Augmentation de la richesse = objectif + 1 point d'ici 2015
 - i. Organisation de la récolte (régionalisation)
 - ii. Appui au CERF pour la sélection variétale
 - iii. Compréhension des mécanismes agro climatiques générateurs d'écart technique et identification des leviers d'action.
- Augmenter le capital confiance dans la canne et la motivation des décideurs et du grand public
 - i. Quantification et qualification de la multifonctionnalité, économie de l'environnement
- Accélérer la diffusion des résultats de la recherche et des préconisations techniques par la mise en place d'outils et méthodologies appliquées aux différentes typologies de planteurs
- Assurer la veille technique et technologique agricole à l'échelle du monde pour alimenter régulièrement la réflexion de la filière réunionnaise.

Ces axes de recherche sont décisifs pour le développement de la filière. Leur prise en compte prioritaire dans le programme de recherche du CIRAD nous semble aujourd'hui impérative, compte tenu des enjeux.

Nous vous assurons par avance de notre entier soutien pour la mise en oeuvre de ce futur programme et de notre participation active à chaque fois qu'elle vous semblera utile.

Veuillez agréer, Monsieur le Délégué Régional, l'expression de nos plus sincères salutations.

Le Délégué Général,
Bernard RIVIERE



ANNEXE 3 : La canne à sucre, présentation générale et morphologie

La canne à sucre (*Saccharum Officinarum* L.) est une plante vivace de la famille des *Poacées*. Elle se constitue d'une **tige** (figure 4), composée d'une succession de nœuds ligneux, où sont implantés les yeux (bourgeons), et d'entre nœuds gorgés de sucre, de couleur jaune, verte, rouge, violette ou brune selon la variété. A la récolte, les tiges peuvent atteindre une hauteur de 2 à 5 m, pour un diamètre allant généralement de 2 à 4 cm. La richesse en sucre des tiges, plus élevée à la base qu'au sommet, varie entre 10 et 17 %.

Les **feuilles**, sont implantées alternativement sur les nœuds, formant ainsi deux rangs opposés approximativement dans le même plan. Elles se constituent de deux parties : la gaine (qui enveloppe la tige) et le limbe, séparés par une articulation de gaine (ochrea) (figure 5). Le nombre de feuilles vertes est faible chez les jeunes plants et augmente graduellement avec l'âge. Pendant la période de développement maximum, le nombre des feuilles vertes par tiges est de dix environ, selon la variété et les conditions de croissance. A la récolte, elles peuvent mesurer entre 2 et 10 cm de large et 60 à 150 cm de long. La surface foliaire peut ainsi atteindre 8 à 10 fois la surface du sol occupée par la canne (Van Dillewijn 1960).

Sur la surface des limbes, les **stomates** assurent deux rôles principaux : la transpiration qui se manifeste par une perte d'eau sous forme de vapeur d'eau, entraînant un refroidissement des tissus de la plante, et l'échange des gaz avec l'atmosphère extérieure, dont le CO₂ pour la photosynthèse. Le mouvement stomatique est grandement influencé par les facteurs externes dont les plus importants sont la lumière, la température, et l'humidité.



Figure 38 :
Tiges de canne à
différents stades de
croissance
(Fahrasmane and
Ganou-Parfait 1997)

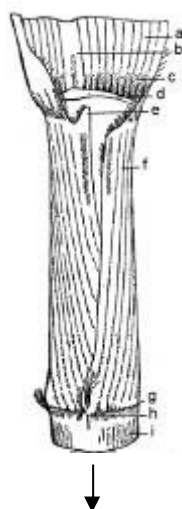


Figure 39 :
Structure d'une feuille : (a)
limbe (b) nervure médiane
(c) ochréa (d) ligule (e)
auricule (f) gaine (g) base de
la gaine (h) marge
décurrente (i) entre-nœud.
D'après (Artschwager 1925)

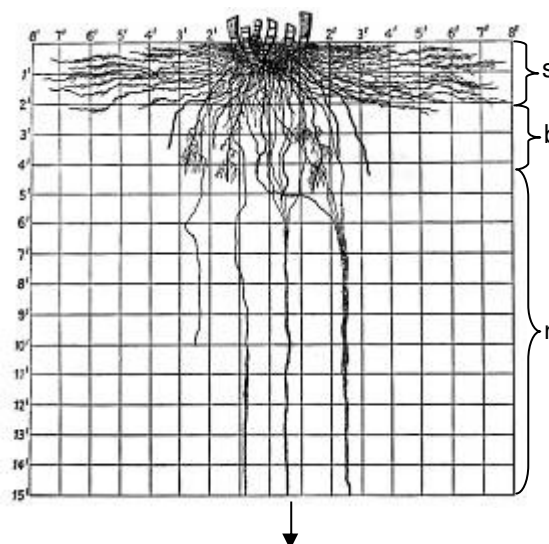


Figure 40 :
Système racinaire de canne à sucre
montrant les différents types de
racines. (s) racines superficielles (b)
racines soutien (r) racines cordon.
D'après (Evans 1935).

Lorsqu'une bouture de canne est plantée, deux sortes de **racines** se développent. Les racines de bouture sont les premières à émerger. Minces, ramifiées et superficielles, elles ont une vie passagère et alimentent les jeunes tiges issues des bourgeons jusqu'à ce que ces dernières émettent leurs propres racines appelées racines de tige (figure 9) comprenant 3 types (Evans 1935; Van Dillewijn 1960) décrits sur la figure 6 :

- Les racines superficielles, fibreuses et ramifiées, qui ont un rôle essentiellement d'absorption,
- Les racines de soutien ou de fixation plus épaisses et plus profondes,
- Les racines cordons, peu nombreuses et capables de descendre jusqu'à 4 à 6 m en conditions de sol favorables.

La fonction du système racinaire est double : il permet l'absorption de la ration d'eau et de matières nutritives nécessaires à la plante, et sert à la fixation.

ANNEXE 4 : Les cycles de la canne à sucre

1. Le cycle de récolte

Le cycle de récolte est le temps écoulé entre deux coupes successives ou entre une plantation et la première coupe de la parcelle.

En exploitation agricole, la canne est multipliée par voie végétative, à l'aide de tiges entières ou de portions de tiges (boutures) plantées généralement dans des sillons. Sur les nœuds de ces boutures, les primordiums racinaires et bourgeons donneront respectivement des racines et des tiges qui porteront les feuilles, talleront et stockeront le sucre. Selon les conditions environnementales, la variété, et l'état de la plante, chaque tige pourra éventuellement fleurir. Après la coupe, les repousses de tiges permettent plusieurs récoltes successives.

A La Réunion, le cycle de récolte dure en moyenne de 11 à 13 mois, et peut s'étendre jusqu'à 18 mois pour les cannes vierges (nouvellement plantées).

Les différentes étapes du cycle de récolte après une plantation sont présentées en figure 41.

2. Le cycle de culture

Le cycle de culture, ou cycle total, est le temps écoulé entre deux plantations. A La Réunion, Les plantations ont lieu généralement de Novembre à Mars (période chaude et pluvieuse). Le cycle de culture moyen est de 10 ans, alors que les instituts techniques préconisent une replantation tous les 5 ou 6 ans.

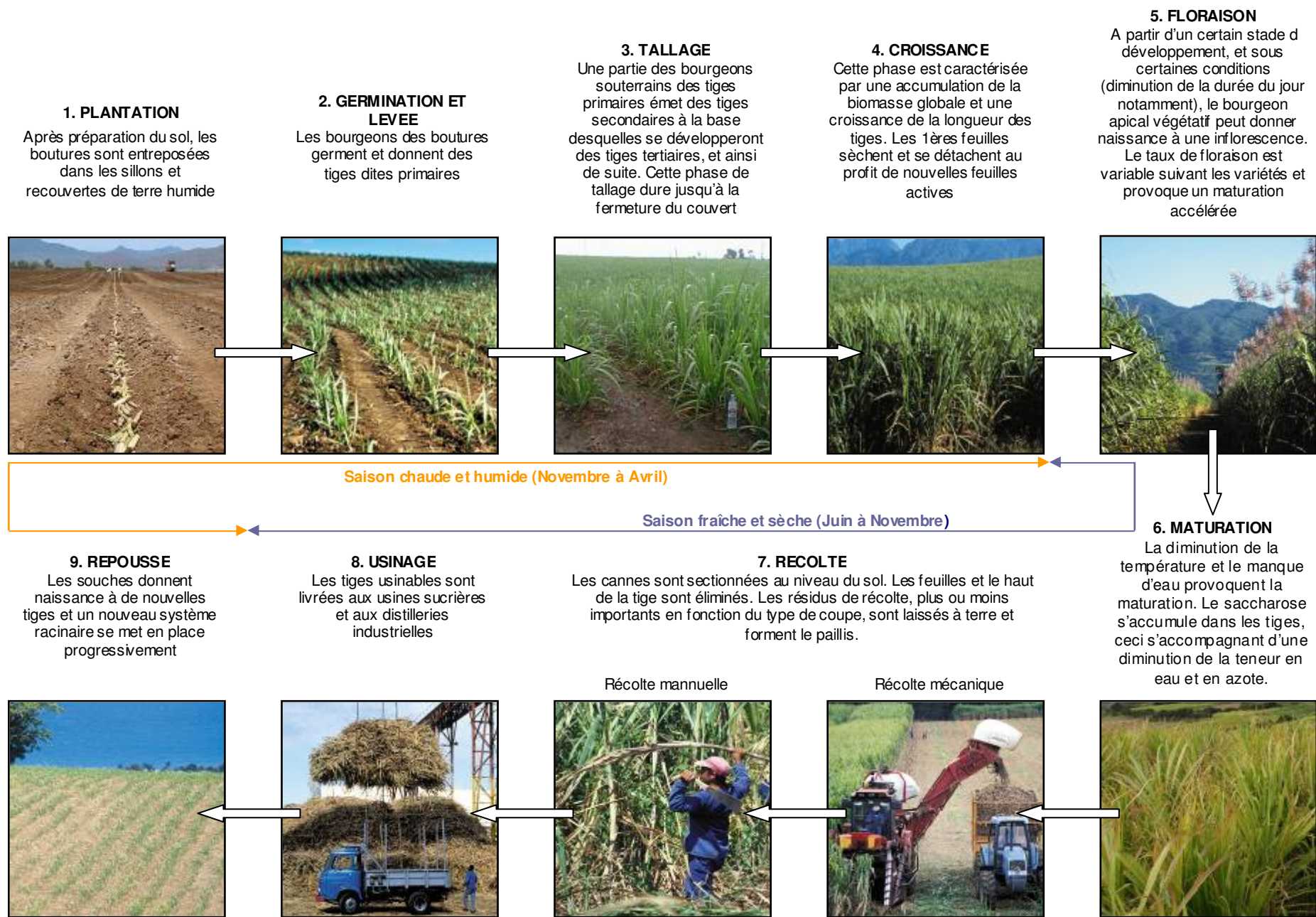


Figure 41 : Etapes du cycle de récolte de la canne à sucre à La Réunion

ANNEXE 5 : Profils de déformation géométrique

Ces profils de déformation géométrique caractérisent les distorsions de la lentille pour chaque couple « capteur – objectif » à une focale donnée (correspondant à la focale utilisée lors des acquisitions aéroportées) (Pierrot-Desseilligny 2008).

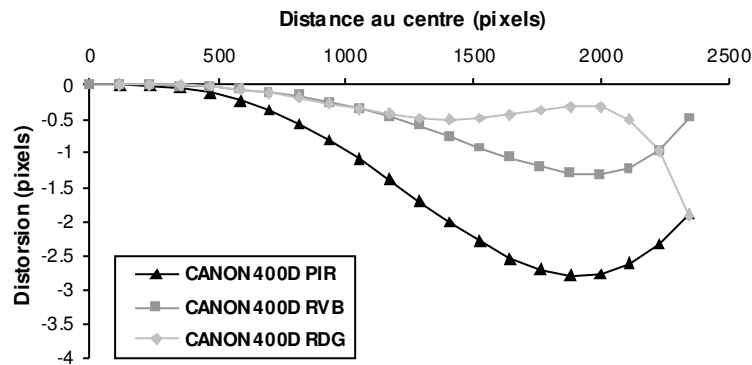


Figure 42 : Profils diagonaux de déformation géométrique des capteurs EOS 400D (CANON®) établis pour une distance focale égale à 35 mm

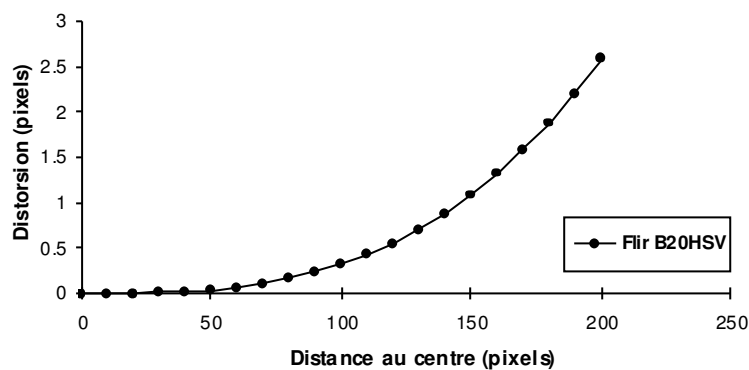
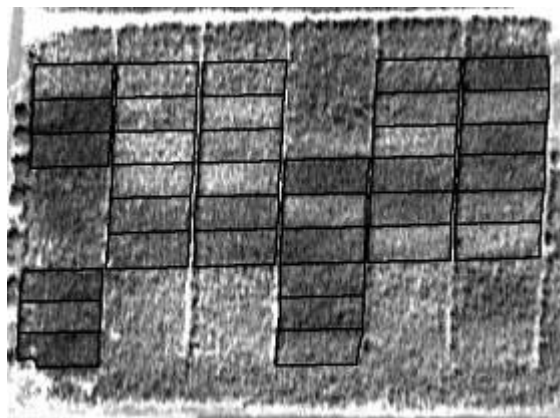


Figure 43 : Profil diagonal de déformation géométrique de la caméra thermique B20HSV (Flir Systems®) (distance focale = 36 mm).

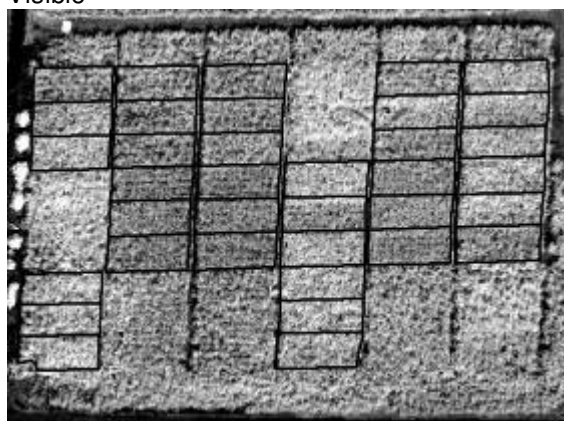
ANNEXE 6 : Exemples d'acquisition sur la parcelle expérimentale de La Mare, le 29 juin 2007



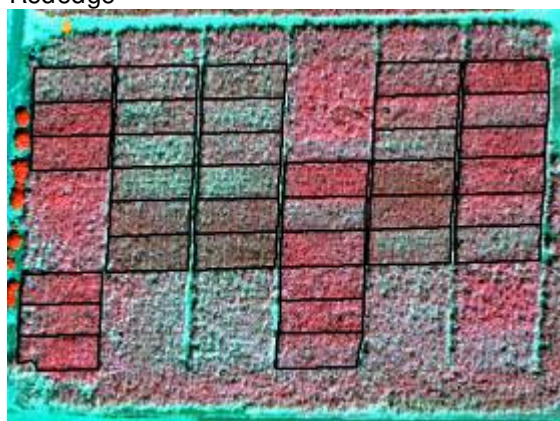
Visible



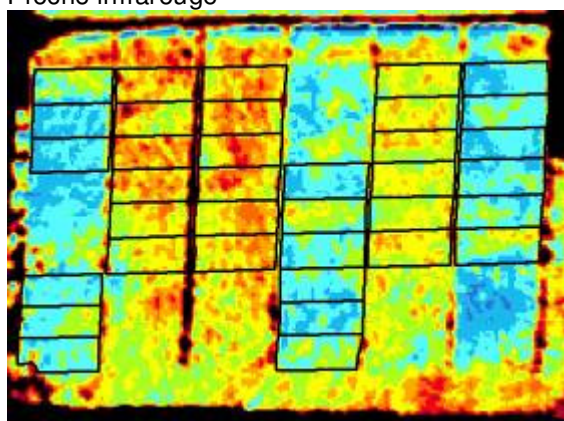
Rededge



Proche infrarouge



Composition colorée (PIR/rouge/vert)



Infrarouge thermique

Figure 44 : Illustration des images acquises dans le visible, le rededge, le proche infrarouge et l'infrarouge thermique le 29 juin 2007 au dessus de la parcelle de La Mare.

ANNEXE 7 : Images et indices

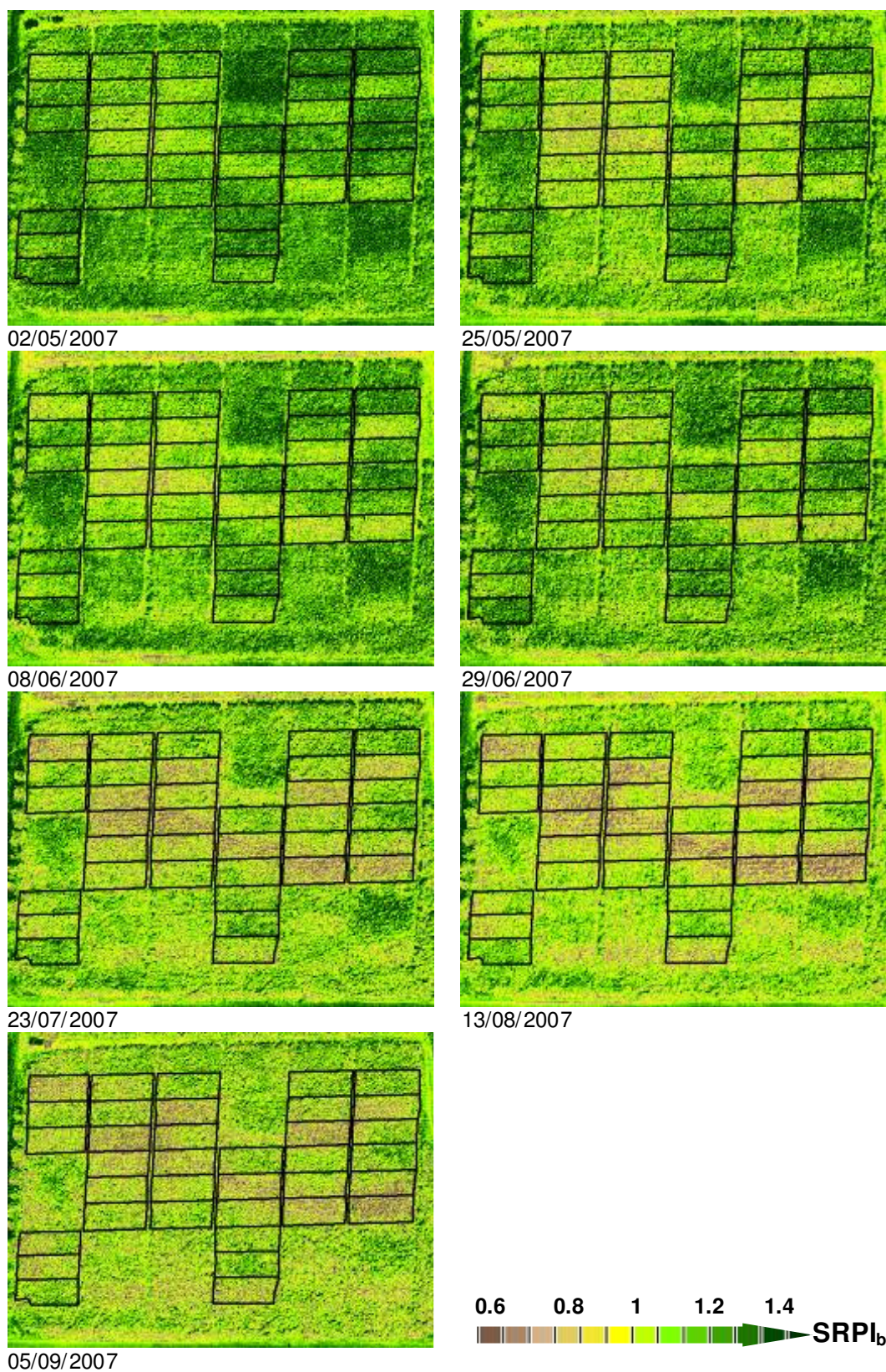


Figure 45 : Evolution temporelle du SRPI_b sur la parcelle de La Mare.

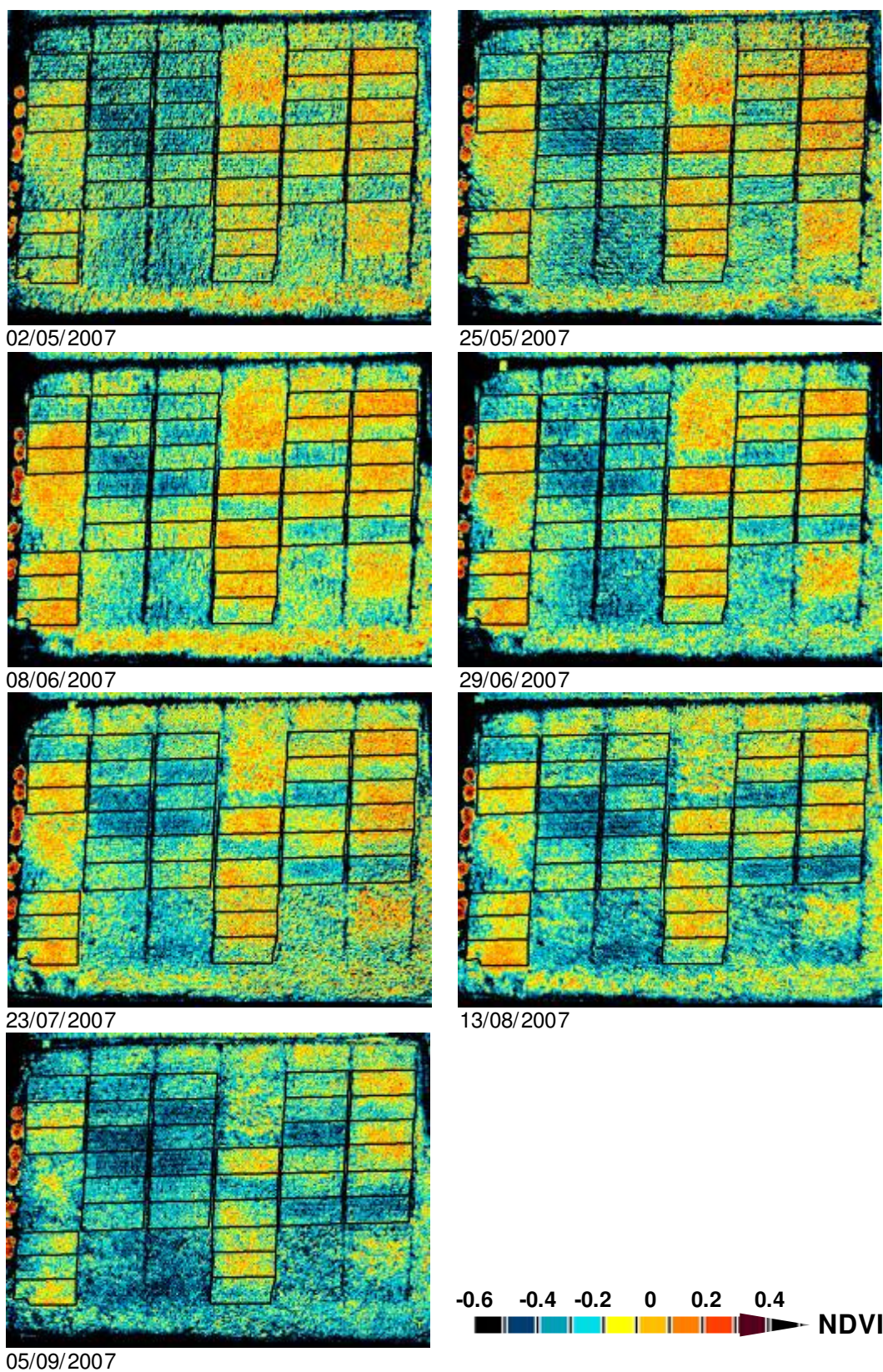


Figure 46 : Evolution temporelle du NDVI sur la parcelle de La Mare.

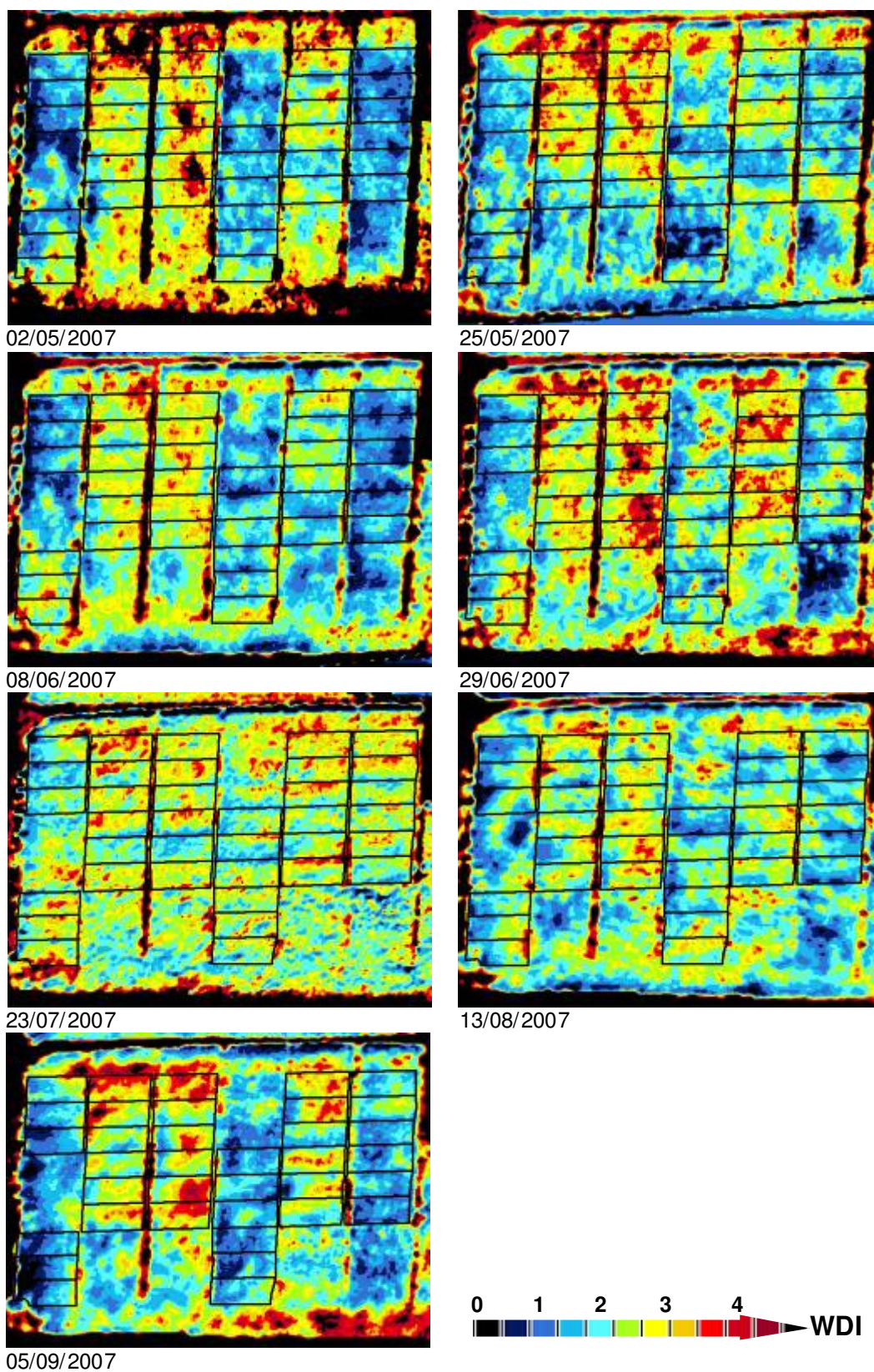


Figure 47 : Evolution temporelle du WDI sur la parcelle de La Mare.